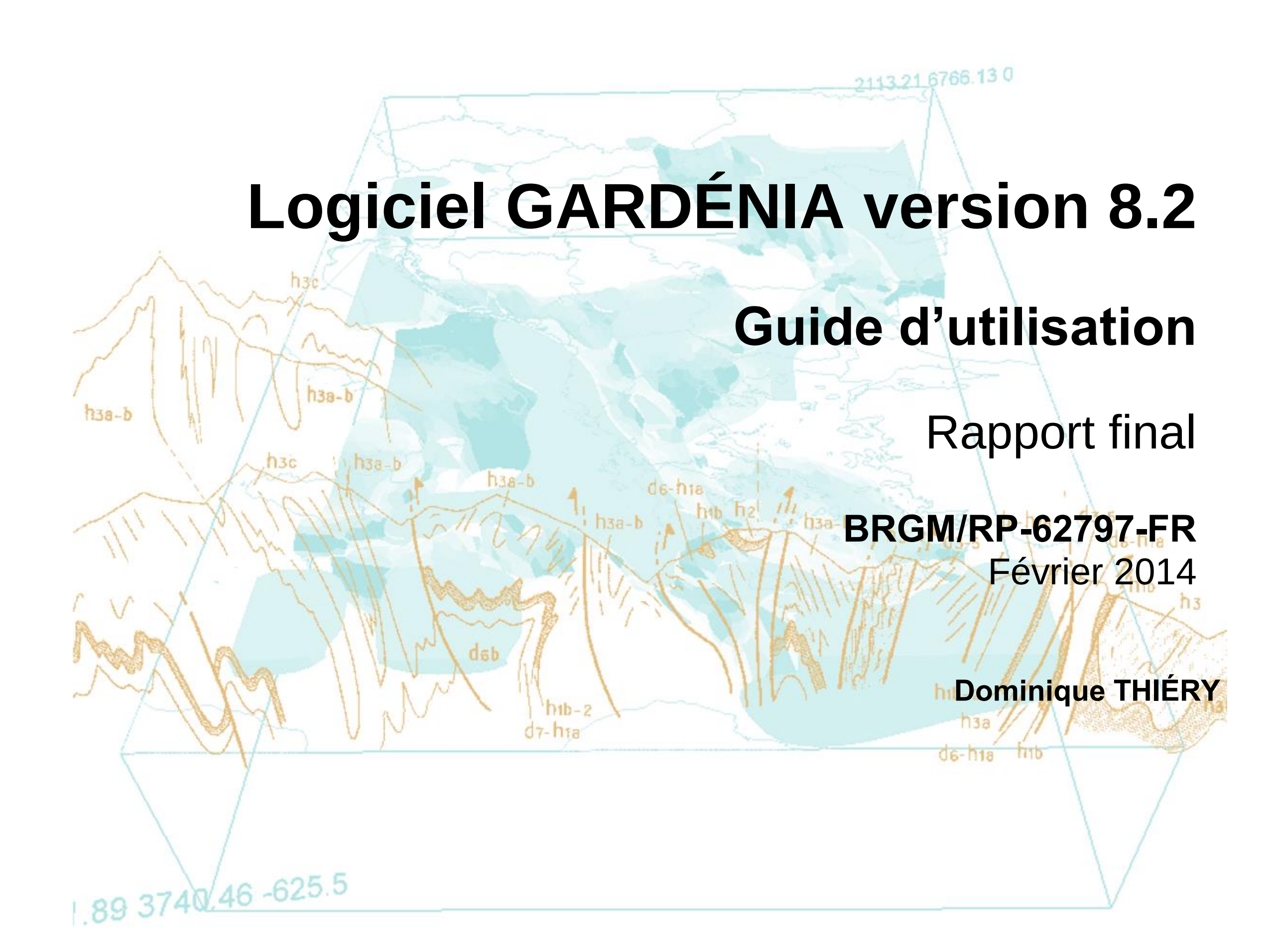


Document public



Logiciel GARDÉNIA version 8.2

Guide d'utilisation

Rapport final

BRGM/RP-62797-FR
Février 2014

Dominique THIÉRY





Logiciel GARDÉNIA version 8.2

Guide d'utilisation

Rapport final

BRGM/RP-62797-FR
Février 2014

Dominique Thiéry

Vérifié par :

Nom : Y. Barthélemy

Date : 09/02/2014

Approuvé par :

Nom : S. Lallier

Date : 15/02/2014



Mots clés : Code de calcul GARDÉNIA, Guide d'utilisation, Modèle à réservoirs, Bilan hydrologique, Pluie-Débit, Pluie-Niveau, Prévision hydrologique.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Thiéry D. (2014) - Logiciel GARDÉNIA, version 8.2. Guide d'utilisation. BRGM/RP-62797-FR, 126 p., 65 fig., 2 ann.

Synthèse

Le code de calcul GARDÉNIA (modèle **G**lobal **A** **R**éservoirs pour la simulation des **DÉ**bits et des **NI**veaux **A**quifères) (Thiéry, 2003, 2011, 2013) est un modèle hydrologique global à réservoirs pour la simulation des bassins versants.

À partir de la séquence des données météorologiques (précipitations, évapotranspiration potentielle) sur un bassin d'alimentation, il permet de calculer :

- le débit à l'exutoire d'un cours d'eau (ou celui d'une source) ;

et / ou

- le niveau piézométrique en un point de la nappe libre sous-jacente.

Les effets d'un pompage, ou d'un ensemble de pompages, situés dans le bassin versant peuvent être pris en compte.

GARDÉNIA est un modèle hydrologique global à réservoirs. Il simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, écoulement) par des lois physiques simplifiées. Ces lois physiques simplifiées correspondent à un écoulement à travers une succession de réservoirs.

Les calculs peuvent être réalisés au pas de temps journalier, décadaire (dix jours) ou mensuel. Il est également possible d'utiliser des pas de temps fins au choix de l'utilisateur : par exemple 5 mn ou ½ heure.

Il est possible de prendre en compte la fonte de la neige.

Le code de calcul GARDÉNIA est utilisé de façon courante pour l'extension de données, tant dans l'espace que dans le temps. Il permet les fonctionnalités suivantes :

- génération de longues séries de débits ou de niveaux piézométriques à partir d'historiques de pluies, après calibration préalable sur une période relativement courte ;
- analyse de cohérence entre observations climatiques et observations de débits ou de niveaux piézométriques ;
- analyse des différents termes du cycle hydrologique (infiltration, évapotranspiration, écoulement).

Dans la pratique, GARDÉNIA permet d'analyser le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant, d'étendre des données de débits et / ou de niveaux. Il peut ainsi aider au dimensionnement de différents types d'ouvrages (barrages) ou aménagements (parkings, ouvrages de captage en rivière, microcentrales électriques), etc.

En effet, le modèle, une fois calibré, est en mesure :

De reconstituer, pour un bassin versant donné, les débits d'une rivière ou d'une source, et / ou les niveaux piézométriques en un point d'une nappe, durant une période pendant laquelle on ne possède pas de mesures.

De simuler :

- des débits résultant de périodes de sécheresse (débits d'étiage ou dimensionnement de barrage) ou de séquences de précipitations exceptionnelles (dimensionnement de fondations, de parkings, d'ouvrages enterrés),
- des niveaux piézométriques ponctuels de nappe à partir de précipitations effectivement observées, prolongées par des scénarios de précipitations prévisionnels (sécheresses, périodes de hautes eaux).

Enfin, le code de calcul GARDÉNIA est conçu pour enchaîner le traitement de plusieurs bassins avec des options communes. Il constitue donc un outil tout particulièrement adapté aux synthèses régionales pour lesquelles on désire réaliser, avec une certaine cohérence, l'analyse de plusieurs bassins versants.

GARDÉNIA v.8.2 dispose en particulier des nouvelles fonctionnalités suivantes :

- Possibilité de calibrer les paramètres du modèle simultanément sur la série des débits mesurés à l'exutoire du bassin et sur une série de niveaux piézométriques en un point représentatif du bassin. Cette fonctionnalité permet une amélioration significative de la fiabilité de la calibration.
- Possibilité de prendre en compte une série temporelle de prélèvements (ou d'injection) de débits dans le bassin versant.

Ce rapport est une actualisation du rapport « Logiciel GARDÉNIA version 6.0 - Guide d'utilisation rapport BRGM/RP-52832-FR » (Thiéry, 2003).

Le rapport est constitué de plusieurs parties :

- La première partie décrit le principe global de fonctionnement du code de calcul GARDENIA, le domaine d'application, les données nécessaires à son utilisation, l'analyse et élaboration des jeux de données, le fonctionnement détaillé du modèle, la calibration (le calage), à quoi s'ajoutent des conseils d'utilisation ;
- La deuxième partie est le manuel d'utilisation détaillé du code de calcul.
- La troisième partie présente un exemple de mise en œuvre du code de calcul, mais le lecteur consultera avec profit un didacticiel (Thiéry, 2013) qui présente par ailleurs la mise en œuvre pratique de nombreuses modélisations dans des contextes variés.
- Une quatrième partie présente cinq exemples de validation destinés à montrer que les lois décrivant le fonctionnement du code de calcul GARDÉNIA correspondent à une simplification des lois physiques complexes régissant les écoulements dans un bassin versant réel.

  Le but de cette validation est de montrer que le schéma de fonctionnement du code de calcul GARDÉNIA n'est pas de type « boîte noire » ou « traitement du signal » mais correspond un schéma physique simplifié ce qui est un gage important de robustesse. La robustesse est la capacité à produire des simulations fiables y compris dans des conditions de fonctionnement (sécheresses, changement climatique) différentes de celles de la période de calibration.

  Cette validation est réalisée principalement par comparaison avec des résultats de modélisation d'hydrosystèmes réels avec le code de calcul MARTHE du BRGM qui utilise une approche physique, avec une discrétisation par volumes finis, selon la loi de Darcy en milieu saturé et non saturé.

Les cinq exemples de validation présentés sont les suivants :

- Modélisation des données d'un lysimètre recouvert de végétation et suivi pendant plus d'un an et demi : validation du schéma de calcul de l'ETR et du schéma de percolation. Comparaison avec des mesures de drainage et des mesures de teneur en eau par sondes à neutrons.
- Modélisation de parcelles expérimentales en sol nu ou avec culture de maïs pendant 3 ans : validation du schéma de calcul de l'ETR et du schéma de percolation. Comparaison avec des mesures de drainage et des mesures de teneur en eau par sonde à neutrons.
- Modélisation des variations de niveau d'une nappe fortement influencée par des pompages proches : validation du schéma de calcul de l'influence de pompages. Comparaison avec la modélisation effectuée avec le code MARTHE de l'influence des pompages.
- Modélisation des débits à l'exutoire d'un bassin versant ayant une forte composante souterraine : validation du schéma de calcul des écoulements souterrains. Comparaison avec les débits calculés avec le code MARTHE dans un aquifère à transmissivité et coefficient d'emmagasinement uniformes.
- Modélisation d'un bassin versant disposant des mesures de débits à l'exutoire et ayant un niveau de nappe présentant fluctuations de plus de 20 mètres en réaction aux pluies efficaces : validation du schéma de calcul des débits et des niveaux piézométriques. Comparaison avec les niveaux et débits calculés par le code discrétisé MARTHE dans un aquifère traversé par un cours d'eau spatialisé avec propagation amont - aval.

Un didacticiel (Thiéry, 2013) présente la mise en œuvre pratique de nombreuses modélisations dans des contextes variés, et en particulier quatre des exemples de validation.

Avertissement : Les données hydroclimatiques qui sont fournies avec la distribution du code de calcul sont destinées uniquement à un usage didactique. Pour des raisons de propriété intellectuelle elles ne doivent en aucun cas être utilisées à un autre usage. Elles ont d'ailleurs pu être volontairement modifiées ou dénaturées.

Sommaire

Liste des annexes

Liste des illustrations

Liste des Tableaux

1. Introduction

Le code de calcul GARDÉNIA (modèle **G**lobal **A** **R**éservoirs pour la simulation des **DÉ**bits et des **NI**veaux **A**quifères) (Thiéry, 2003, 2011, 2013) est un modèle hydrologique global à réservoirs pour la simulation des bassins versants.

À partir de la séquence des données météorologiques (précipitations, évapotranspiration potentielle) sur un bassin d'alimentation, il permet de calculer :

- le débit à l'exutoire d'un cours d'eau (ou celui d'une source) ;

et / ou

- le niveau piézométrique en un point de la nappe libre sous-jacente.

Les effets d'un pompage, ou d'un ensemble de pompages, situés dans le bassin versant peuvent être pris en compte.

GARDÉNIA est un modèle hydrologique global à réservoirs. Il simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, écoulement) par des lois physiques simplifiées. Ces lois physiques simplifiées correspondent à un écoulement à travers une succession de réservoirs.

Les calculs peuvent être réalisés au pas de temps journalier, décadaire (dix jours) ou mensuel. Il est également possible d'utiliser des pas de temps fins au choix de l'utilisateur : par exemple 5 mn ou ½ heure.

Il est possible de prendre en compte la fonte de la neige.

Le code de calcul GARDÉNIA est utilisé de façon courante pour l'extension de données, tant dans l'espace que dans le temps. Il permet les fonctionnalités suivantes :

- génération de longues séries de débits ou de niveaux piézométriques à partir d'historiques de pluies, après calibration préalable sur une période relativement courte ;
- analyse de cohérence entre observations climatiques et observations de débits ou de niveaux piézométriques ;
- analyse des différents termes du cycle hydrologique (infiltration, évapotranspiration, écoulement).

Dans la pratique, GARDÉNIA permet d'analyser le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant, d'étendre des données de débits et / ou de niveaux. Il peut ainsi aider au dimensionnement de différents types d'ouvrages (barrages) ou aménagements (parkings, ouvrages de captage en rivière, microcentrales électriques), etc.

En effet, le modèle, une fois calibré, est en mesure :

De reconstituer, pour un bassin versant donné, les débits d'une rivière ou d'une source, et / ou les niveaux piézométriques en un point d'une nappe, durant une période pendant laquelle on ne possède pas de mesures ;

De simuler :

- des débits résultant de périodes de sécheresse (débits d'étiage ou dimensionnement de barrage) ou de séquences de précipitations exceptionnelles (dimensionnement de fondations, de parkings, d'ouvrages enterrés),
- des niveaux piézométriques ponctuels de nappe à partir de précipitations effectivement observées, prolongées par des scénarios de précipitations prévisionnels (sécheresses, périodes de hautes eaux).

Enfin, le code de calcul GARDÉNIA est conçu pour enchaîner le traitement de plusieurs bassins avec des options communes. Il constitue donc un outil tout particulièrement adapté aux synthèses régionales pour lesquelles on désire réaliser, avec une certaine cohérence, l'analyse de plusieurs bassins versants.

GARDÉNIA v.8.2 dispose en particulier des nouvelles fonctionnalités suivantes :

- Possibilité de calibrer les paramètres du modèle simultanément sur la série des débits mesurés à l'exutoire du bassin et sur une série de niveaux piézométriques en un point représentatif du bassin. Cette fonctionnalité permet une amélioration significative de la fiabilité de la calibration.
- Possibilité de prendre en compte une série temporelle de prélèvements (ou d'injection) de débits dans le bassin versant.

Ce rapport est une actualisation du rapport « Logiciel GARDÉNIA version 6.0 - Guide d'utilisation rapport BRGM/RP-52832-FR » (Thiéry, 2003).

Le rapport est constitué de plusieurs parties :

- La première partie décrit le principe global de fonctionnement du code de calcul GARDENIA, le domaine d'application, les données nécessaires à son utilisation, l'analyse et élaboration des jeux de données, le fonctionnement détaillé du modèle, la calibration (le calage), à quoi s'ajoutent des conseils d'utilisation ;
- La deuxième partie est le manuel d'utilisation détaillé du code de calcul.
- La troisième partie présente un exemple de mise en œuvre du code de calcul, mais le lecteur consultera avec profit un didacticiel (Thiéry, 2013) qui présente par ailleurs la mise en œuvre pratique de nombreuses modélisations dans des contextes variés.
- Une quatrième partie présente cinq exemples de validation destinés à montrer que les lois décrivant le fonctionnement du code de calcul GARDÉNIA correspondent à une <u>simplification des lois physiques</u> complexes régissant les écoulements dans un bassin versant réel.

  Le but de cette validation est de montrer que le schéma de fonctionnement du code de calcul GARDÉNIA n'est pas de type « boîte noire » ou « traitement du signal » mais correspond un schéma physique simplifié ce qui est un <u>gage important de robustesse</u>. La robustesse est la capacité à produire des simulations fiables y compris dans des conditions de fonctionnement (sécheresses, changement climatique) différentes de celles de la période de calibration.

  Cette validation est réalisée principalement par comparaison avec des résultats de modélisation d'hydrosystèmes réels avec le code de calcul MARTHE du BRGM qui utilise une approche physique, avec une discrétisation par volumes finis, selon la loi de Darcy en milieu saturé et non saturé.

Les cinq exemples de validation présentés sont les suivants :

- Modélisation des données d'un lysimètre recouvert de végétation et suivi pendant plus d'un an et demi : validation du schéma de calcul de l'ETR et du schéma de percolation. Comparaison avec des mesures de drainage et des mesures de teneur en eau par sondes à neutrons.
- Modélisation de parcelles expérimentales en sol nu ou avec culture de maïs pendant 3 ans : validation du schéma de calcul de l'ETR et du schéma de percolation. Comparaison avec des mesures de drainage et des mesures de teneur en eau par sonde à neutrons.
- Modélisation des variations de niveau d'une nappe fortement influencée par des pompages proches : validation du schéma de calcul de l'influence de pompages. Comparaison avec la modélisation effectuée avec le code MARTHE de l'influence des pompages.
- Modélisation des débits à l'exutoire d'un bassin versant ayant une forte composante souterraine : validation du schéma de calcul des écoulements souterrains. Comparaison avec les débits calculés avec le code MARTHE dans un aquifère à transmissivité et coefficient d'emmagasinement uniformes.
- Modélisation d'un bassin versant disposant des mesures de débits à l'exutoire et ayant un niveau de nappe présentant fluctuations de plus de 20 mètres en réaction aux pluies efficaces : validation du schéma de calcul des débits et des niveaux piézométriques. Comparaison avec les niveaux et débits calculés par le code discrétisé MARTHE dans un aquifère traversé par un cours d'eau spatialisé avec propagation amont - aval.

Un didacticiel (Thiéry, 2013) présente la mise en œuvre pratique de nombreuses modélisations dans des contextes variés, et en particulier quatre des exemples de validation.

Avertissement : Les données hydroclimatiques qui sont fournies avec la distribution du code de calcul sont destinées uniquement à un usage didactique. Pour des raisons de propriété intellectuelle elles ne doivent en aucun cas être utilisées à un autre usage. Elles ont d'ailleurs pu être volontairement modifiées ou dénaturées.

2. Description du modèle GARDÉNIA

Les chapitres suivants vont préciser les mécanismes de fonctionnement du modèle GARDÉNIA en examinant successivement :

- le principe de fonctionnement d'un modèle hydrologique global,
- le domaine d'application de GARDÉNIA,
- les données nécessaires à son utilisation,
- l'analyse et l'élaboration de ces données,
- les schémas de fonctionnement.

L'utilisateur déjà familier avec ces notions peut se reporter directement au chapitre « Notice d'utilisation du code de calcul GARDÉNIA ». Il est cependant vivement conseillé de lire avec soin le chapitre « Conseils d'utilisation ».

2.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN MODÈLE HYDROLOGIQUE GLOBAL À RÉSERVOIRS

Un modèle hydrologique global simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, écoulement) par des lois physiques simplifiées. Ces lois physiques simplifiées correspondent à un écoulement à travers une succession de réservoirs.

Les transferts d'un réservoir à l'autre sont régis par des lois simples décrites par les paramètres dimensionnels du modèle (capacité de rétention du sol, temps de transfert, seuils de débordement, etc.).

En raison du caractère global de cette schématisation et de la complexité du système hydrologique réel, ces paramètres, bien qu'ayant un sens physique, peuvent difficilement être déduits *a priori* des caractéristiques physiographiques ponctuelles du bassin versant (géologie, couverture végétale, etc.).

Les paramètres doivent donc être déterminés :

- soit par ajustement (calibration) sur une ou deux séries d'observations,
- soit, exceptionnellement, par transposition à partir de la modélisation de bassins versants proches et de caractéristiques similaires.

- **Calibration (calage) des paramètres**

La calibration (ou calage) consiste à ajuster les valeurs des paramètres du modèle, de telle sorte qu'ils permettent de calculer des débits et / ou des niveaux piézométriques aussi proches que possible des débits et / ou des niveaux piézométriques observés.

Les données nécessaires à la calibration des paramètres sont :

- des séries temporelles ininterrompues d'« entrées » du modèle : pluie et évapotranspiration (éventuellement température de l'air, s'il y a prise en compte de la fonte de la neige) ;

- éventuellement une série temporelle de débits de prélèvement (ou d'injection) dans le bassin ;
- une ou deux série temporelle d'observations, (débits à l'exutoire et / ou niveaux piézométriques), non nécessairement continues, mais pour une période concomitante aux séries précédentes. Cette série, ou ces deux séries, seront comparées avec les « sorties » du modèle. Trois cas sont possibles : on peut disposer au choix de :
    - une série d'observations des débits à l'exutoire du bassin

  ou

    - une série d'observations des niveaux piézomètriques représentatifs en un point du bassin

  ou

    - une série d'observations des débits à l'exutoire ***et*** une série d'observations des niveaux piézomètriques représentatifs en un point du bassin. C'est cette configuration qui permet le maximum de fiabilité.

La calibration se fait par une méthode semi-automatique. L'utilisateur fournit un jeu de paramètres initiaux et indique les paramètres qui seront à optimiser.

À partir de ceux-ci, le modèle fait varier ces paramètres (dans une gamme de valeurs définie par l'utilisateur) et recherche, par un algorithme d'optimisation non-linéaire adapté de la méthode de Rosenbrock (1960), un jeu de paramètres fournissant les résultats les plus proches possibles de la série d'observations.

Il fournit à l'utilisateur :

- des bilans des différentes composantes de l'écoulement (évapotranspiration réelle, infiltration, écoulement...) ;
- une représentation graphique permettant de comparer observations et simulations ;
- des critères numériques d'évaluation de la qualité de l'ajustement.

Muni de ces renseignements, l'utilisateur juge de la nécessité d'essayer une nouvelle optimisation à partir d'un jeu de paramètres qu'il est libre de modifier à sa guise.

Lorsqu'à la fois les critères numériques d'ajustement et les graphiques de comparaison visuelle sont satisfaisants, il peut considérer qu'il dispose d'un jeu de paramètres représentatifs du bassin dans la mesure où les valeurs obtenues sont réalistes. Il peut alors, éventuellement, explorer diverses gammes de variations des paramètres autour de cette solution, afin de déterminer la famille des paramètres représentant, de façon acceptable de son point de vue, le cycle de l'eau (étude de sensibilité).

2.2. DOMAINES D'APPLICATION

2.2.1. Application à l'extension de séries de débits d'un bassin jaugé

L'application la plus fréquente du modèle GARDÉNIA est l'extension de données hydrométriques dans le temps. Ayant calibré le modèle sur une courte série de pluies, débits et niveaux (quelques années), on utilise une série de pluies plus longue (généralement disponible) pour générer avec le modèle une série correspondante de débits et de niveaux piézométriques.

La série de pluies utilisée peut être ou bien une série observée, ou bien une série générée par tirages au hasard, après avoir identifié la structure du processus statistique régissant ces pluies (analyse des données effectuée avec le module Shalimar par exemple).

Pourquoi ne pas étendre directement les séries de débits à partir de leurs propres caractéristiques statistiques ?

C'est essentiellement parce que le processus des pluies présente une mémoire très courte, contrairement aux débits. Pour un pas de temps mensuel par exemple, il est tout à fait licite, dans la plupart des climats, de générer des pluies par des tirages au hasard indépendants dans les lois de distribution des pluies de chaque mois. En revanche, une telle procédure serait souvent erronée pour des débits et presque toujours pour des niveaux piézométriques.

2.2.2. Application à la prévision

En simulant un certain nombre (une cinquantaine) de scénarios d'évolution à partir d'une date donnée, il est possible d'en effectuer des statistiques : cela conduit à une évaluation probabiliste des débits auxquels on peut s'attendre pour une durée de l'ordre de grandeur du temps de mémoire du système hydrologique. À plus longue échéance, le dernier état observé n'a plus d'influence réelle sur ces débits.

2.2.3. Exploitation ultérieure de séries de débits

Les séries de débits générées par un modèle peuvent ensuite être utilisées :

- pour évaluer les ressources en eau disponibles en cas de sécheresse d'occurrence rare (alimentation en eau potable, irrigation, etc.) ;
- pour dimensionner des microcentrales ou des barrages-réservoirs par la simulation de la gestion de ceux-ci en temps réel sur une série chronologique ;
- pour mettre au point un système de gestion de ces équipements (en utilisant les possiblités de prévision pour améliorer les performances de la gestion).

2.3. LES DONNÉES NÉCESSAIRES À L'UTILISATION DU MODÈLE

Il faut disposer des données suivantes :

- une série continue de précipitations (lames d'eau) ;
- une série continue d'évapotranspirations potentielles (ETP)

  L'ETP peut éventuellement être calculée à partir d'une série continue de durée d'insolation et de températures de l'air (et éventuellement d'humidités relatives). Voir chapitre « Utilisation du module Etpturc » ;
- éventuellement une série temporelle de débits de prélèvement (ou d'injection) dans son bassin ;
- éventuellement une série continue de températures de l'air (uniquement si l'on prend en compte la fonte de la neige) ;
- éventuellement une série continue de précipitations neigeuses (équivalent en eau) facultative ;
- éventuellement une série, pas forcément continue, de débits à l'exutoire du bassin versant.
- éventuellement une série, pas forcément continue, de niveaux en un piézomètre situé dans le bassin.

Ces 2 à 7 séries doivent être disponibles sur la même période d'observations, et il est bon de disposer de précipitations et d'évapotranspirations potentielles (ETP) pendant au moins un an avant le début des mesures de débit, ou même pendant plusieurs années auparavant en cas de simulation de niveaux piézométriques (pour faciliter l'initialisation du modèle).

Par ailleurs, la calibration du modèle fait intervenir des paramètres « hydrologiques » (capacité de réserve superficielle, temps de tarissement, coefficient de correction de la lame d'eau...) qui seront décrits plus bas.

2.3.1. La lame d'eau

La lame d'eau pendant le pas de temps (en mm/pas de temps) est une moyenne pondérée des précipitations des différents postes pluviométriques relatifs au bassin versant. En cas de précipitations neigeuses, l'équivalent en eau de la neige peut être ajouté à la pluie ou bien être traité séparément. Il est nécessaire d'effectuer au préalable une critique des données, permettant la reconstitution des éventuelles données brutes manquantes, la série devant être ininterrompue.

La lame d'eau peut se calculer par une des méthodes d'interpolation suivantes :

- méthode des isohyètes ;
- polygones de Thiessen ;
- moyenne arithmétique ;
- autres pondérations arbitraires (avec ou sans correction des différences d'altitude entre bassin et poste pluviométrique) ;
- analyse en composantes principales ;
- krigeage.

Si plusieurs postes pluviométriques sont disponibles, il est conseillé de tous les utiliser, pour l'analyse et la critique des données.

Ensuite, on choisira un système de pondération qui réduira l'influence des erreurs aléatoires pouvant affecter certains postes.

2.3.2. L'évapotranspiration potentielle (ETP)

La valeur utilisée est généralement l'ETP calculée selon la formule de Penman ou calculée selon la formule mensuelle de Turc (Turc, 1961). En France, les données d'ETP sont disponibles dans la « Climathèque » de Météo-France. Il est également possible de calculer l'ETP : par exemple le module « Etpturc », dont l'utilisation est décrite plus loin, permet de calculer facilement l'évapotranspiration potentielle au pas de temps journalier, décadaire ou mensuel, d'après la formule mensuelle de Turc, en utilisant les données de durée d'insolation, de température et éventuellement d'humidité relative de l'air. Toute autre méthode de calcul peut bien entendu être utilisée. Dans le code de calcul GARDÉNIA, l'ETP doit être donnée en mm par pas de temps, par exemple en mm/mois si le pas de temps choisi est le pas de temps mensuel.

Des mesures sur le terrain, réalisées à l'aide de bacs ou d'évaporomètres, sont parfois disponibles mais rarement détaillées. Elles nécessitent d'être analysées avec soin avant exploitation.

Si l'on ne possède aucune donnée susceptible de fournir l'évapotranspiration potentielle pendant la période d'observation, on peut éventuellement utiliser les moyennes interannuelles de chaque mois sans commettre d'erreurs trop importantes (comparativement aux incertitudes portant sur l'évaluation des lames d'eau).

2.3.3. La température moyenne de l'air

On utilisera généralement la valeur définie comme la moyenne des températures minimale et maximale (de chaque jour ou de chaque mois) exprimée en °C.

Comme pour les précipitations, on sera parfois amené à pondérer les données de plusieurs postes. Il sera souvent nécessaire de corriger ces températures pour tenir compte des différences d'altitude entre le bassin étudié et les postes de mesure disponibles.

Remarque :
Toutes les données « d'entrée » doivent être continues, c'est-à-dire ne comporter aucune lacune. Ces données peuvent être échantillonnées selon l'un des pas de temps suivants :
- *le jour ;*
- *la décade : 365 jours / 36 (soit environ 10 jours) ;*
- *le mois : 365 jours / 12 = 3 décades.*

Chaque type de donnée peut être choisi à un pas de temps différent, mais les pluies doivent être au pas de temps le plus fin. Par exemple, on peut imaginer le cas suivant :

- pluies journalières ;
- évapotranspirations potentielles mensuelles ;
- débits observés décadaires.

Le pas de temps de calcul sera le pas de temps le plus fin, c’est-à-dire celui de la pluie.

2.3.4. Les débits à l’exutoire et les niveaux piézométriques

Ces données peuvent présenter des lacunes et ne sont pas nécessaires dans le cas de l’utilisation de GARDÉNIA en simulation.

Les débits sont en m^3/s. Les niveaux de nappe sont en mètres, généralement en m NGF (Nivellement Général de la France), cependant tout autre repère de niveau est acceptable. On notera cependant qu'il s'agit de niveaux et non de profondeurs : en l'absence de nivellement, on pourrait cependant utiliser l'opposé de la profondeur (c'est-à-dire par exemple -23.7 m pour une profondeur de 23.7 m).

Pour une calibration sur des niveaux de nappe, il faut s’assurer que le piézomètre pris en compte n'est pas trop près d’un cours d’eau, car l’influence de ce dernier pourrait masquer les variations de niveau de la nappe dans le piézomètre.

2.4. ANALYSE ET ÉLABORATION DES DONNÉES

Les données d’entrée du modèle (lame d’eau, ETP, débits mesurés et / ou niveaux piézométriques) doivent être analysées et élaborées à partir d’informations fournies par des mesures ponctuelles, souvent incomplètes.

2.4.1. Analyse des pluies

Plusieurs démarches d’analyse des données existantes sont possibles. Nous distinguerons deux cas :

- Étude rapide d’un bassin (pas de temps mensuel pour toutes les données) :
  - recueillir plusieurs séries de pluies et de débits,
  - dessiner chaque série,
  - repérer les périodes concomitantes de données,
  - compléter les séries des pluies par régression multiple avec les postes voisins,
  - choisir une pondération et calculer la lame d’eau pour la période la plus longue possible,
  - calculer les ETP en utilisant si nécessaire une série de moyennes mensuelles interannuelles ;
- Étude très détaillée d’un bassin (pas de temps mensuel pour toutes les données) :
  - recueillir des séries nombreuses de pluies dépassant assez largement les limites du bassin versant,
  - dessiner les séries et repérer les périodes concomitantes,
  - faire une analyse en composantes principales, repérer les données et les stations s’écartant le plus du comportement général, corriger éventuellement le fichier et refaire l’analyse,
  - cartographier différentes variables (pluies moyennes interannuelles, composantes principales),
  - rechercher d’éventuelles liaisons altitude/pluie, mettre au point des méthodes de correction par application d’une relation linéaire,

- affecter suivant plusieurs règles et plusieurs pondérations, les postes pluviométriques au bassin versant, comparer les lames d'eau ainsi calculées, estimer la précision de l'évaluation.

Remarque :
Une étude régionale ne se distingue pas dans sa démarche de l'étude précédente. Néanmoins, il est commode de disposer de fichiers contenant les coordonnées des stations pluviométriques et les coordonnées des contours des bassins, permettant de localiser et de cartographier les différents bassins versants étudiés. Des procédures automatiques d'attribution des postes pluviométriques aux bassins versants permettent alors d'alléger considérablement les manipulations ultérieures.

2.4.2. Analyse des évapotranspirations potentielles

Il n'est pas question, dans la majeure partie des études, de réaliser une étude fine de l'évapotranspiration. Les données disponibles sont trop peu nombreuses, les fluctuations climatiques sont trop faibles vis-à-vis des incertitudes pesant sur la pluie et sur le schéma hydrologique pour que l'on s'attarde à une discussion exhaustive des différentes mesures et méthodes de calcul.

Il s'agit pour le modèle de disposer d'un indice présentant les variations saisonnières principales du phénomène. La formule de Penman ou la formule mensuelle de Turc (1961) est alors amplement suffisante. Néanmoins, il est important de garder à l'esprit qu'il ne s'agit là que d'un indicateur : des écarts de l'ordre de 20 % en moyenne sont tout à fait possibles. De tels écarts existent entre évaluations réalisées avec des méthodes différentes : formules de Penman, de Turc, de Brochet. Les données d'évaporomètres peuvent également servir d'indicateur (bac Colorado de classe A, etc.). On prendra soin cependant de ne pas mélanger dans une même série des données de différentes provenances : elles ne sont généralement pas comparables.

Après évaluation des ETP par la formule mensuelle de Turc (voir le chapitre relatif à l'utilisation du module « Etpturc »), on pourra éventuellement utiliser les facteurs culturaux définissant l'évaporation maximale à un stade végétatif donné pour différentes cultures. Néanmoins, la complexité à l'échelle du bassin versant est telle qu'il ne semble pas nécessaire d'utiliser de tels facteurs de correction.

Quand on ne dispose pas de données, on peut parfois se contenter d'une évaluation d'évapotranspiration moyenne interannuelle pour chaque mois.

2.4.3. Analyse des débits ou des niveaux piézométriques

Les séries d'entrée doivent être sous forme d'un historique continu de données à pas de temps constant. En revanche, les séries d'observations servant à la calibration du modèle (données de débit et / ou de niveau de nappe) peuvent présenter des lacunes. Il serait inutile et même dangereux d'employer une quelconque méthode de reconstitution des données manquantes, pour calculer des valeurs supplémentaires qui serviraient à la calibration.

Il est bon toutefois de représenter sur un même graphique à différents pas de temps si possible, les pluies et les débits (et / ou les niveaux) avant d'entreprendre une simulation. Des évènements particuliers peuvent alors être identifiés : débits exceptionnels non précédés de pluies, épisodes pluvieux notables n'ayant pas contribué à l'écoulement, baisse ou remontée brusque de niveaux (présence de pompages ou arrêt de ceux-ci).

Dans de nombreux cas, des erreurs de report et de saisie des données peuvent ainsi être détectées avant tout calcul. Par ailleurs, des écarts importants observés lors de la comparaison des simulations et des observations pourront également inciter à revoir cette analyse.

Lorsqu'on dispose de plusieurs séries de débit dans des stations relativement proches, il peut être intéressant d'étudier les similarités de comportement de ces séries, par une approche statistique du même type que celle utilisée pour les pluies. Pour les niveaux piézométriques, il est également important de connaître la position du point de mesure des niveaux par rapport au cours d'eau, afin de pouvoir estimer si les variations de niveaux sont surtout dues à la pluie ou à l'influence du cours d'eau.

2.4.4. Connaissance du bassin. Précision des mesures

- **Les termes du bilan**

Les modèles utilisés sont des modèles de bilan des entrées et des sorties d'eau à l'échelle du bassin versant contrôlé par une station de jaugeage et / ou par des mesures de variations de niveau piézométrique.

Il faut bien concevoir que ce bilan n'a de sens que si l'on peut négliger les flux non pris en compte ou si on peut les estimer de façon suffisamment précise.

On s'attachera donc à vérifier que :

- la structure hydrogéologique n'est pas susceptible d'entraîner des échanges souterrains importants avec l'extérieur du bassin versant en dehors de l'exutoire (échanges latéraux ou « sous » la section de jaugeage) ;
- des interventions humaines (canaux, dérivations, prélèvements restitués hors du bassin, etc.) ne modifient pas significativement les termes de ce bilan.

GARDÉNIA est toutefois adapté à l'étude de bassins dont le bilan est affecté par de tels phénomènes, grâce à un jeu de paramètres descriptifs qu'on peut laisser libres de s'optimiser (superficie d'un bassin versant karstique dont on contrôle quelques exutoires, débit de base d'importation ou d'exportation, échanges externes etc.).

Ces possibilités ne doivent cependant être utilisées qu'avec prudence car il arrive parfois que des échanges qu'on avait supposés intuitivement au début de l'étude, doivent être remis en cause.

Il est également possible de prendre en compte directement une série de prélèvements (ou d'injections) par des captages dans le bassin versant.

- **Précision et fiabilité des données**

Les services gestionnaires des réseaux de mesures connaissent bien la qualité des données qu'ils ont élaborées : il est recommandé de les consulter dès le début de l'étude pour connaître leurs particularités, les dates de détarage dues à des travaux, la présence de pompages (surtout dans le cas de simulation pluie-niveau), etc.

Cependant, beaucoup de perturbations ne portent pas atteinte à l'évaluation des flux d'ensemble à l'échelle annuelle : le volume écoulé au cours d'un très fort débit, par une crue mal ou non jaugée, peut rester tout à fait négligeable au pas de temps mensuel.

De la connaissance de la précision des mesures, on retiendra, dans chaque cas, une idée de ce qu'il est raisonnable d'attendre d'une simulation des débits (et des niveaux piézométriques) par un modèle.

Il est inutile de s'attendre à (ou de rechercher) une calibration quasi-parfaite si la qualité des données est douteuse.

2.5. FONCTIONNEMENT DU MODÈLE

2.5.1. Introduction

Le modèle GARDÉNIA représente le cycle de l'eau depuis les précipitations sur un bassin versant jusqu'au débit à l'exutoire *via* le niveau aquifère en un point du bassin (Figure 1). Le modèle est global, car il considère des « entrées » globales (une « lame d'eau » sur le bassin et une évapotranspiration potentielle moyenne sur le bassin) et une ou deux « sorties », qui sont le débit à l'exutoire du bassin et / ou les variations de niveau piézométrique en un point de la nappe sous-jacente. Le modèle simule le cycle de l'eau par un système de trois ou quatre réservoirs en cascade qui représentent respectivement :

- les premières dizaines de centimètres du sol dans lesquelles se produit l'évapotranspiration (zone d'influence des racines de la végétation) ;
- une zone intermédiaire qui produit un écoulement rapide ;
- une ou deux zones aquifères qui produisent de l'écoulement lent.

L'allure exponentielle du tarissement des débits de rivières et des niveaux de nappes souterraines est identique à celle de la vidange d'un réservoir. Le comportement d'un système aquifère peut donc être représenté par un ensemble de réservoirs se vidant les uns dans les autres. Des fonctions de transferts non linéaires permettent en outre d'améliorer cette approche un peu schématique.

- **Réservoirs du modèle**

Le modèle GARDÉNIA comprend au maximum quatre (ou cinq) réservoirs ; cependant, par l'intermédiaire des paramètres (et des options), il est possible d'utiliser un schéma simplifié ne faisant intervenir que deux ou trois réservoirs. Le schéma des réservoirs est précisé sur les Figure 2 à Figure 4.

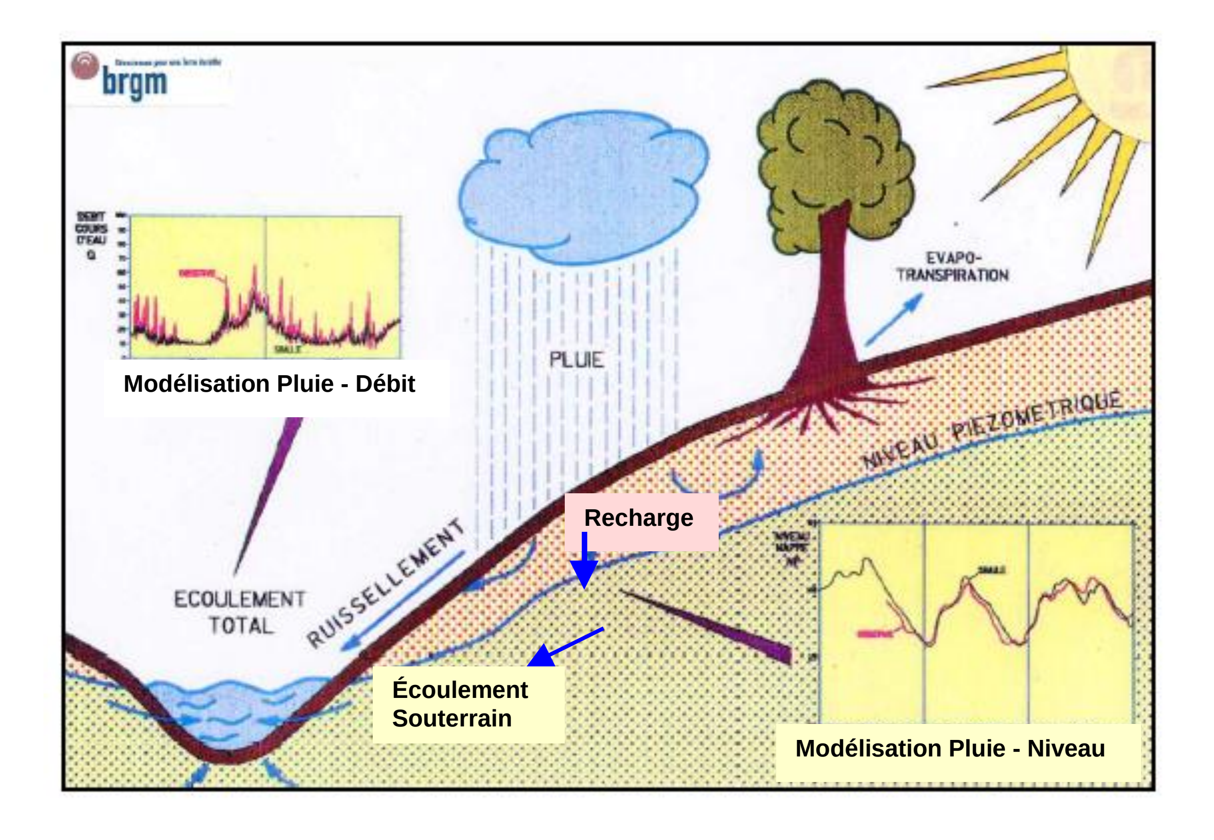
Le modèle réalise un bilan entre les apports (précipitations) et les sorties (écoulements ou évapotranspiration) à chacun des pas de calcul.

- **Fonction « production » et fonction « transfert »**

Le calcul comporte deux parties traditionnellement appelées : fonction « production » et fonction « transfert ».

La fonction « production » détermine quelle quantité d'eau sera apportée au modèle et quelle quantité sera évaporée ou s'infiltrera dans les horizons inférieurs pour ressortir « plus tard » à l'exutoire du bassin.

La fonction « transfert » détermine à quel moment l'eau qui n'a pas été évapotranspirée ressortira à l'exutoire du bassin ou arrivera à la nappe. Le transfert s'effectue par passage à travers les deux ou trois réservoirs inférieurs du modèle.



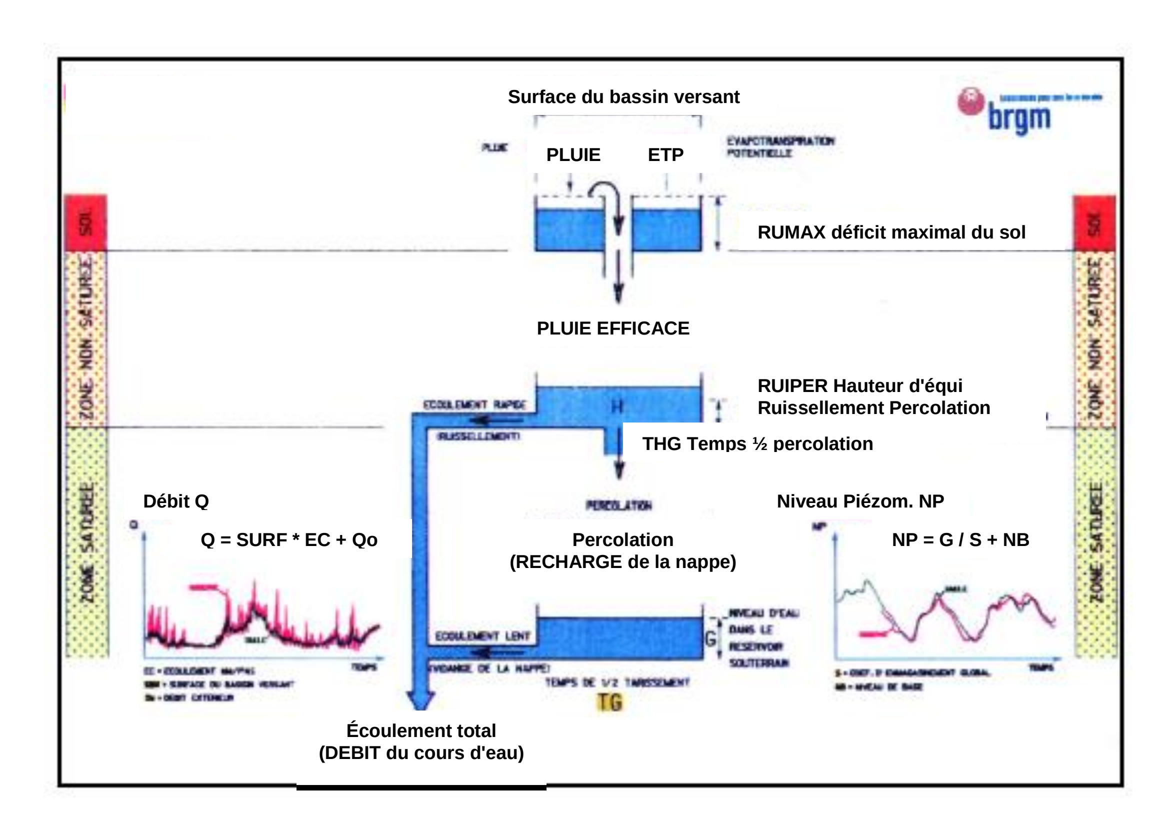


Figure 1 - Schéma de principe du modèle GARDÉNIA.

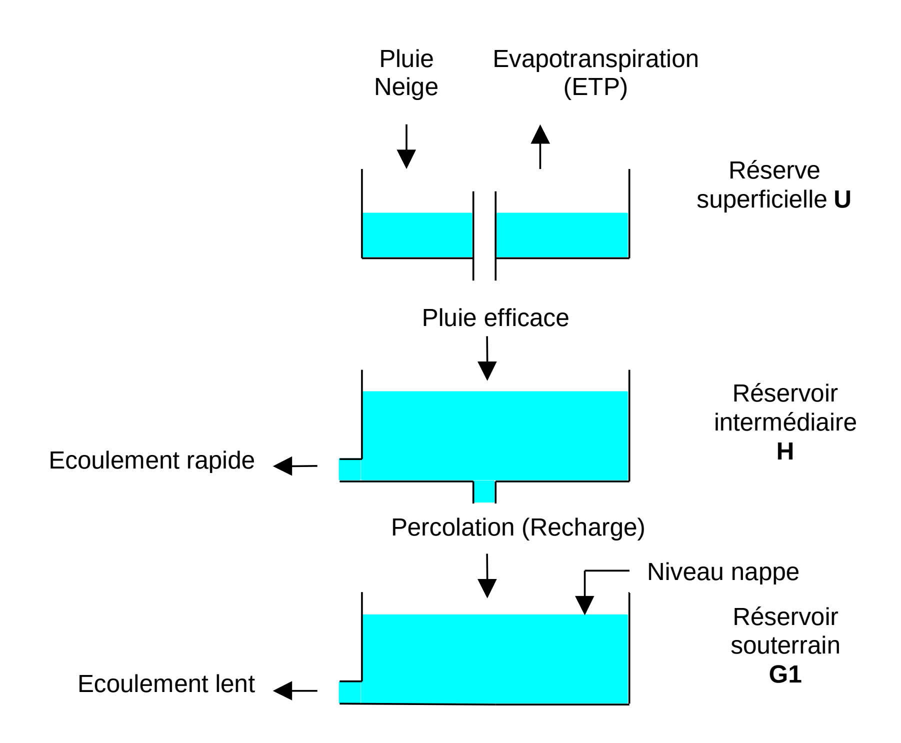


Figure 2 - Schéma le plus simple : un seul réservoir souterrain.

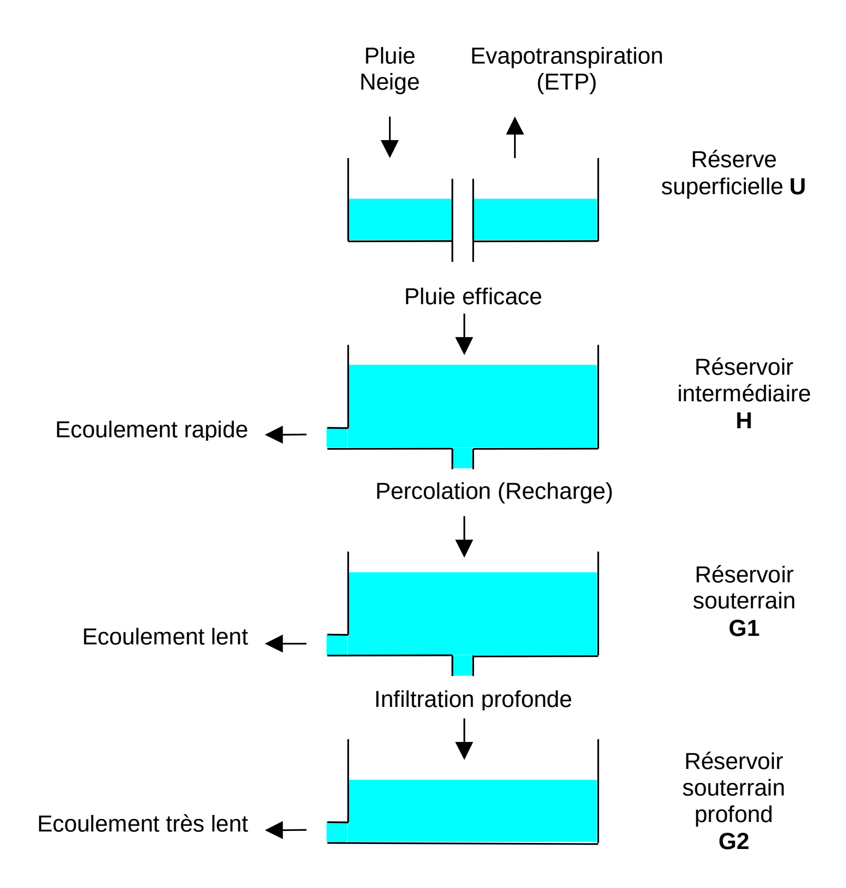


Figure 3 - Schéma complexe : deux réservoirs souterrains.

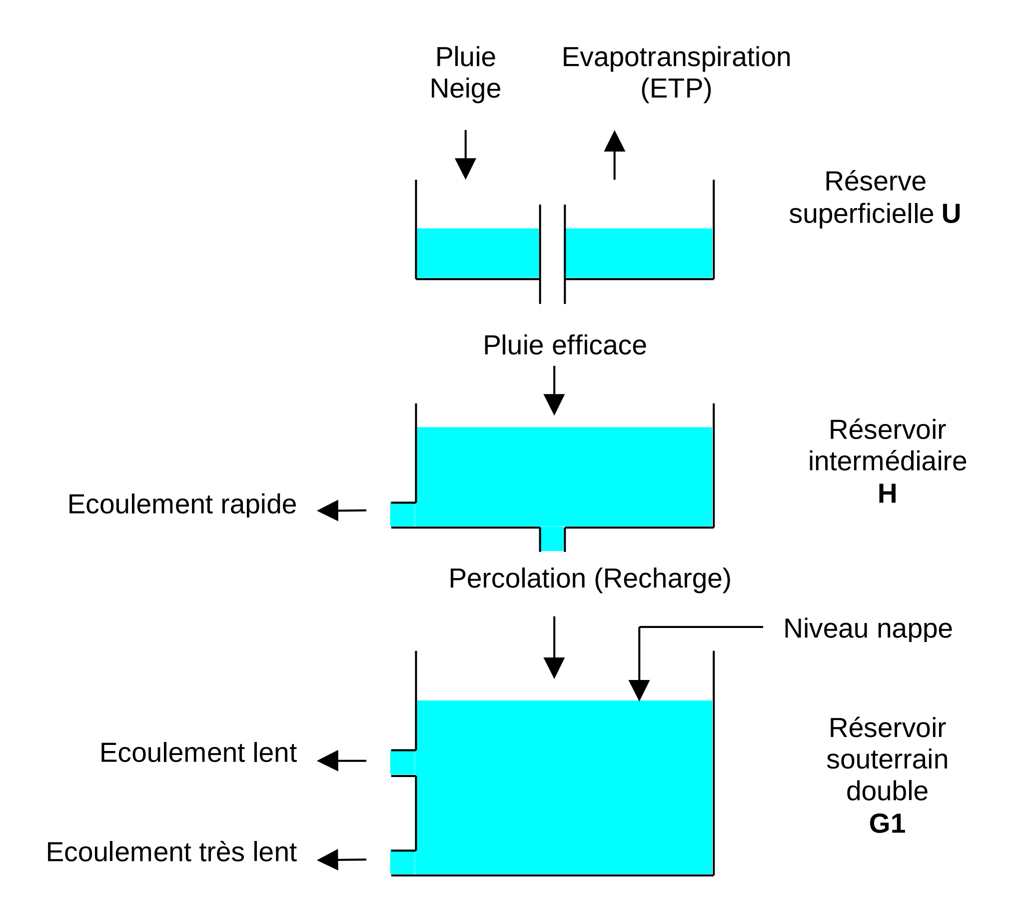


Figure 4 - Schéma complexe : un seul réservoir souterrain à deux orifices de vidange.

- **Initialisation**

Il est évident que l'inertie hydrologique d'un système étant parfois considérable, le calcul des premières valeurs dépend énormément des conditions hydroclimatiques des années précédentes.

Pour éviter les problèmes qui pourraient en résulter, la possibilité de prendre en compte quelques années de démarrage avant les premières observations hydrologiques a été introduite dans le modèle.

Cependant, la mise en régime étant parfois assez lente, le modèle est placé automatiquement en équilibre hydrologique en début de calcul, c'est-à-dire que les états de ses réservoirs sont fixés aux valeurs correspondant à une pluie efficace entrante de référence.

2.5.2. Le bilan dans le réservoir superficiel

Le réservoir superficiel, ou « réservoir sol », représente les premiers centimètres du sol soumis à l’action des racines de la végétation et à l’évaporation (Figure 5).

La fonction « Production » est réalisée uniquement dans le réservoir superficiel (nous n’employons pas - à dessein - le terme « réserve facilement utilisable » qui est celui utilisé par les agronomes pour faire un bilan au niveau des racines des plantes). La capacité du réservoir superficiel est en fait la « réserve disponible pour l’évapotranspiration » ou la « capacité de rétention » hors eau liée. Elle intègre également la capacité d'interception par les parties aériennes de la végétation ainsi que les volumes des éventuelles dépressions à la surface du sol (flaques, sillons, etc.).

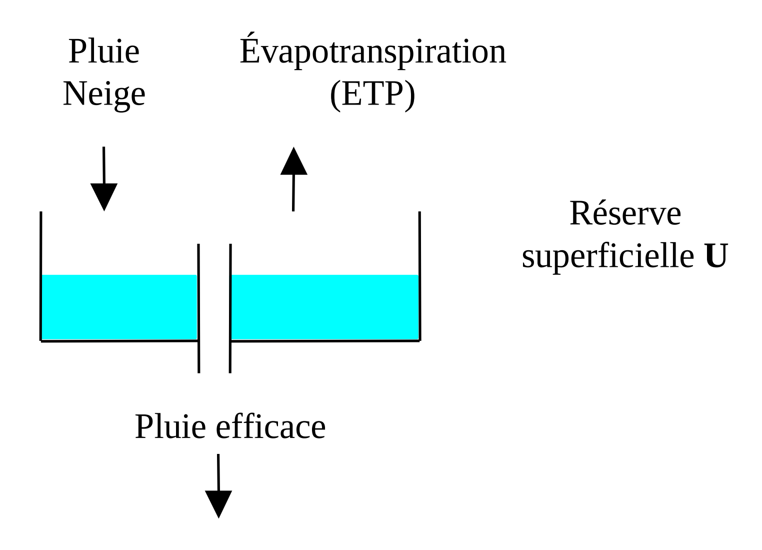


Figure 5 – Le réservoir superficiel.

Deux schémas de réservoirs superficiels sont possibles :

- Un réservoir sol de type « réserve utile » qui fonctionne en « tout ou rien »
- Un « réservoir sol progressif » avec des lois quadratiques, fonction de l'état de remplissage de ce réservoir.

Le réservoir sol est alimenté par la pluie (et la fonte de la neige, si elle existe, au contact du sol). Il est soumis à l’évapotranspiration réelle ETR.

- **Réservoir sol de type « réserve utile »**

    - Si la pluie est supérieure à l’ETP :
      Pluie efficace = 0 tant que le réservoir n’est pas encore totalement rempli
      Pluie efficace = Pluie – ETP quand le réservoir sol devient totalement rempli.

    - Si l’ETP est supérieure à la pluie :
      ETR = (ETP – Pluie) tant que le réservoir sol n’est pas encore totalement vide.
      ETR = 0 quand que le réservoir sol devient vide.
      Pluie efficace = 0

- **Réservoir sol « progressif »**

On note : Satur = Remplissage du réservoir / Capacité du réservoir :

- Si la pluie est supérieure à l'ETP :
  Pluie efficace = (Pluie - ETP) x $Satur^2$
- Si l'ETP est supérieure à la pluie :
  ETR = (ETP - Pluie) x Satur x (2 - Satur)

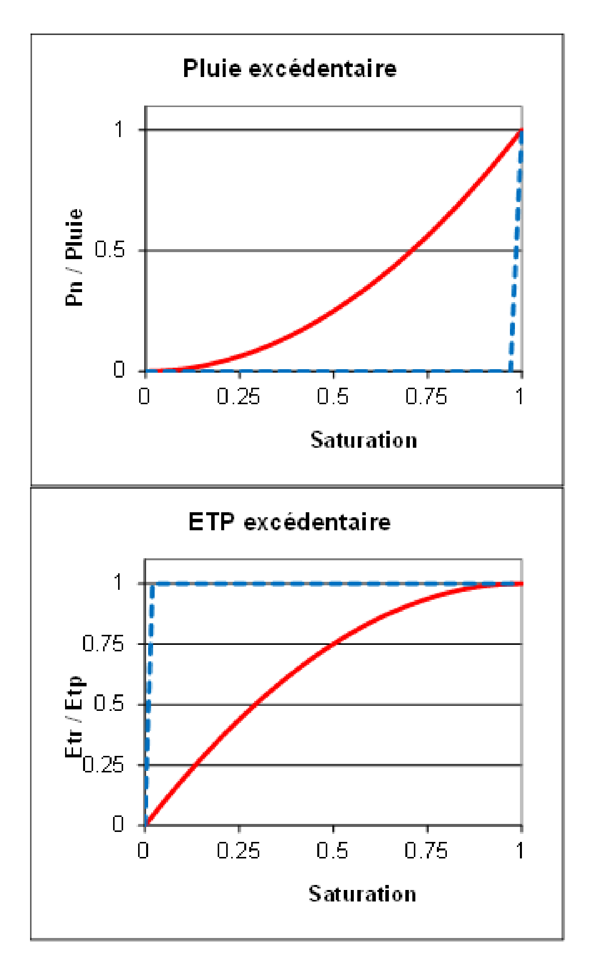


Figure 6 – Percolation Pn et évapotranspiration Etr dans le réservoir sol : en trait interrompu bleu : réservoir de type « réserve utile », en rouge : « réservoir progressif »

Il est possible d'associer en série : un réservoir sol de type « réserve utile » et un réservoir sol « progressif ».

Dans la description du réservoir intermédiaire H, la « pluie efficace » sortant des deux types de réservoirs superficiels est notée ALIMH car c'est elle qui alimente ce réservoir intermédiaire H.

2.5.3. Transfert dans les réservoirs intermédiaires et souterrains

- **Le réservoir intermédiaire H** (**Figure 7**)

Il représente la zone non saturée. La hauteur d'eau qu'il contient à un instant donné est notée H. Il est alimenté en eau par la pluie efficace ALIMH provenant du réservoir superficiel, et est vidangé par deux exutoires :

- percolation dans le réservoir souterrain G1 suivant une loi linéaire (vidange exponentielle) de constante de temps THG :

  ALIMG = H . dt / THG (dt = durée du pas de temps)

- écoulement à l'extérieur du bassin, sous forme d'une composante rapide QH du débit, selon une loi non-linéaire contrôlée par le paramètre RUIPER. Ce paramètre RUIPER est en fait la hauteur d'eau dans le réservoir H pour laquelle la percolation ALIMG et l'écoulement QH sont égaux :

  QH = H . dt / (THG . RUIPER / H)

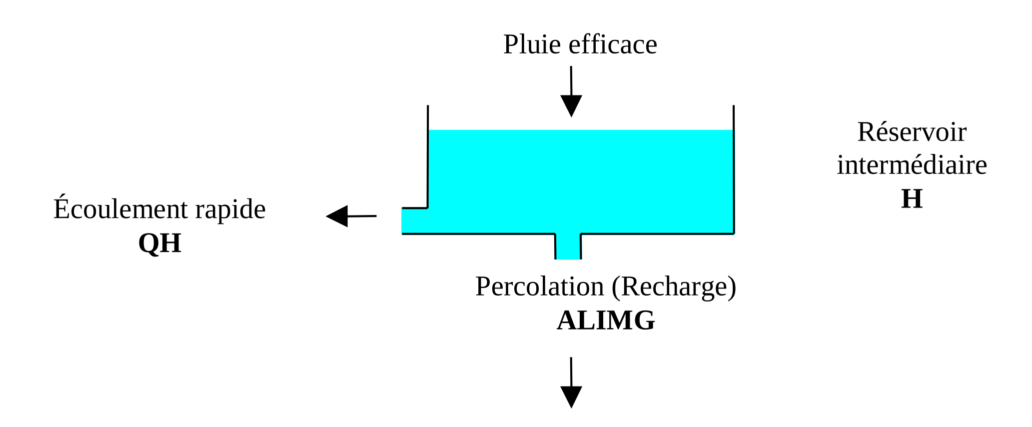


Figure 7 – Schéma du réservoir intermédiaire.

La composante rapide QH du débit est prépondérante quand l'état de remplissage du réservoir H est élevé. En revanche la percolation ALIMG est prépondérante quand l'état de remplissage du réservoir H est plus faible. Le ratio QH / ALIMG est égal au rapport H / RUIPER. Si on donne la valeur code 9999 mm au paramètre RUIPER, il n'y aura pas de composante rapide du débit. Le fonctionnement de ce réservoir H se rapproche donc de celui d'un seuil de débordement progressif à la hauteur moyenne RUIPER, mais avec une représentation plus réaliste de l'écoulement en deux composantes qui ne s'excluent pas mutuellement.

Ce réservoir H sert uniquement au transfert. Le calcul s'effectue en réalisant une répartition entre :

- l'apport d'eau ALIMH (provenant du réservoir superficiel) ;
- et les vidanges ALIMG et QH.

Il est possible, sur option, de décider que cette composante rapide QH du débit s'écoule par ruissellement superficiel et n'est pas contrôlée par la station de jaugeage à l'exutoire.

- **Le réservoir souterrain G1**

Le réservoir souterrain G1 produit l'écoulement lent (ou « écoulement souterrain rapide »). Il représente généralement l'aquifère (Figure 8). La hauteur d'eau qu'il contient à un instant donné est notée G1.

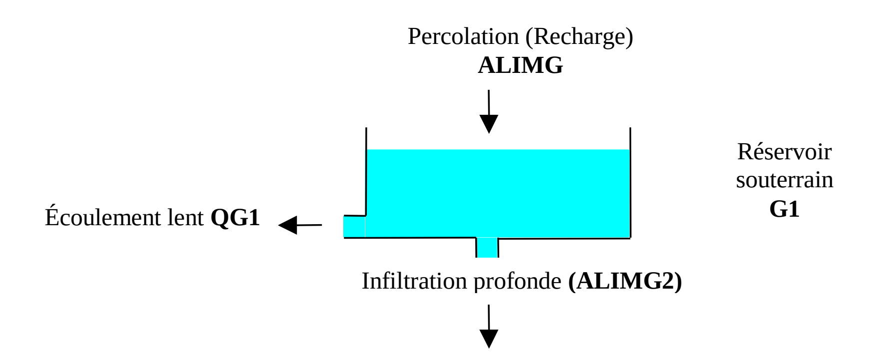


Figure 8 - Schéma du réservoir souterrain G1.

Il est alimenté en eau par le réservoir intermédiaire H. Dans le cas le plus général, il est vidangé par deux exutoires :

- par écoulement vers l'exutoire du bassin sous forme de débit lent QG1, suivant une loi de vidange exponentielle de constante de temps TG1 :

$$QG1 = G1 \cdot dt / TG1$$

- par drainance dans le réservoir souterrain lent G2 (aquifère profond), suivant une vidange exponentielle de constante de temps TG12 :

$$ALIMG2 = G1 \cdot dt / TG12$$

Cette drainance vers le réservoir suterrain lent peut être supprimée dans la plupart des cas où il n'est pas nécessaire de faire intervenir deux composantes lentes.

Comme dans le réservoir intermédiaire H, le calcul s'effectue de la manière suivante :

- apport d'eau : ALIMG1 (provenant du réservoir H) ;
- vidange : QG1 (et éventuellement ALIMG2).

- **Le réservoir souterrain lent G2**

Ce réservoir facultatif, quand il existe, représente un aquifère profond ou une partie inférieure de l'aquifère. La hauteur d'eau qu'il contient à un instant donné est notée G2. Il est alimenté en eau par le réservoir souterrain G1 ; il est vidangé uniquement par un débit très lent (ou « écoulement souterrain lent ») QG2. Un tel débit QG2 est parfois nécessaire pour représenter une composante très lente dans un écoulement (Figure 9).

Il est possible, sur option, de décider que ce débit très lent QG2 s'infiltre vers des horizons plus profonds non contrôlés par les mesures de débit à l'exutoire.

Cette option peut être intéressante pour tenir compte d'un débit de perte par infiltration, variable au cours du temps, vers un horizon profond.

Il faut cependant être conscient que ce débit peut généralement difficilement être estimé directement. Il faudra donc vérifier que les valeurs calculées par le modèle sont plausibles.

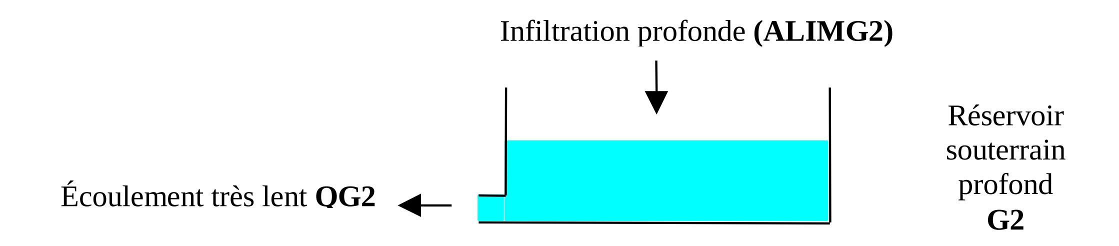


Figure 9 - Schéma du réservoir souterrain profond G2.

- **Le réservoir souterrain G à deux exutoires**

Il est parfois plus avantageux d'utiliser un seul réservoir G à deux exutoires séparés par un seuil (Figure 10). Un tel réservoir simule par exemple la mise en service d'une deuxième sortie quand le niveau d'eau dépasse un seuil.

Un tel réservoir à deux exutoires peut également simuler une cote de débordement ou bien simplement représenter le fait qu'une courbe de tarissement descende plus rapidement au début, quand les deux exutoires débitent simultanément, qu'à la fin quand seul l'exutoire le plus profond est actif. La hauteur d'eau qu'il contient à un instant donné est notée G.

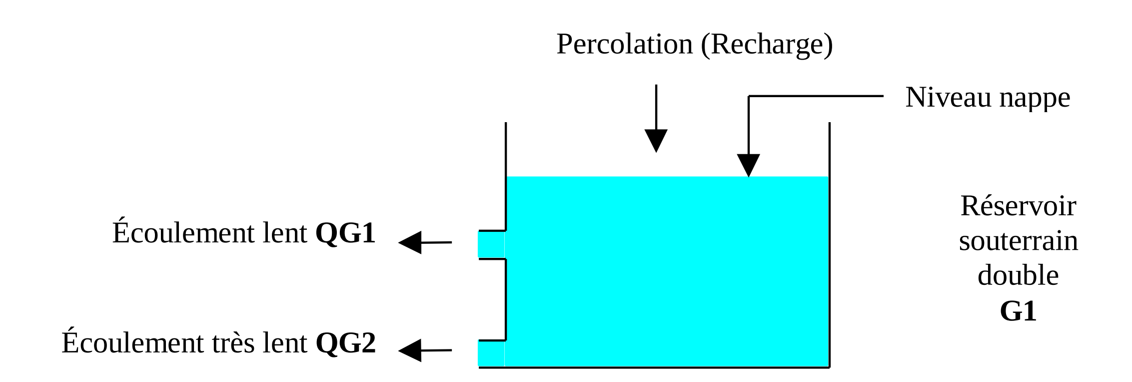


Figure 10 - Schéma d'un réservoir G à deux exutoires.

Un tel réservoir, qui remplace alors le réservoir G1 et l'éventuel réservoir G2, produit donc suivant le cas, une ou deux composantes de débit par lesquels il se vidange :

- QG2 = G . dt / TG2 ;

  et

- QG1 = (G - SEUIL) . dt / TG1 si G est supérieur au SEUIL ;
- QG1 = 0 si G est inférieur ou égal au SEUIL.

Comme pour le réservoir G2, il est possible de décider sur option que le débit QG2 correspond à un écoulement profond non contrôlé par les mesures de débit à l'exutoire.

2.5.4. Échanges souterrains externes

Dans les bassins versants ayant une composante souterraine conséquente, il est fréquent que des échanges souterrains se produisent avec l’extérieur.

- Il peut arriver qu’une partie de la composante souterraine n’apparaissent pas dans le débit mesuré à l’exutoire. Cette partie de l’écoulement souterrain peut se propager dans la nappe souterraine latéralement vers l’extérieur du bassin, ou bien « sous » la section de jaugeage. On a donc une perte de débit (échange souterrain négatif). Ce débit perdu apparaîtra dans un bassin voisin, ou bien dans la mer.
- A l’opposé il peut arriver qu’un débit souterrain additionnel provienne d’un bassin versant voisin. On a alors un gain de débit (échange souterrain positif).

Dans le code de calcul GARDÉNIA ces échanges souterrains sont modélisés avec un coefficient d’échange souterrain externe :

Q_Echang_Souterr = Fact_Echang . QG1_Avant_Echang

soit :

Q_Echang_Souterr = QG1 * Fact_Echang / (1 + Fact_Echang)

Dans le cas d’un schéma avec un réservoir souterrain à deux exutoires, la composante souterraine pérenne est le débit QG2 :

Q_Echang_Souterr = QG2 * Fact_Echang / (1 + Fact_Echang)

Dans tous les cas les échanges souterrains affectent la composante souterraine du débit calculé mais n’affectent pas le niveau du réservoir souterrain. Ils n’affectent donc pas le niveau de la nappe calculé.

2.5.5. Les séries calculées par le modèle

Deux cas sont possibles suivant l’utilisation attendue du modèle :

- Pour calculer le débit à l’exutoire du bassin versant, le modèle calculera :

  Q = QH + QG1 + QG2 : cas général ;

  ou bien, s’il a été décidé que le débit très lent QG2 s’infiltre et n’est pas contrôlé par l’exutoire du bassin (ou bien n’existe pas) :

  Q = QH + QG1 : composante très lente du débit non contrôlée par les mesures.

  On peut également décider que :

  Q = QH : l'exutoire contrôle uniquement la composante rapide de l'écoulement.

  Il est possible également de décider que :

  Q = QG1 ou QG1 + QG2 : l'exutoire contrôle uniquement les composantes lentes.

  Dans tous les cas le débit Q, calculé en mm par pas de temps, est transformé en débit en m^3/s par multiplication par la superficie du bassin versant et ajout de l’éventuel débit extérieur, puis par division par la durée du pas de temps.

- Pour calculer le niveau piézométrique en un point de l’aquifère, le modèle calculera selon le choix de l’utilisateur :

  N = G1 ou N = G2

ou bien, dans le cas d'un réservoir unique à deux exutoires :

$$N = G$$

Ce niveau N, calculé en mm, est transformé niveau absolu en mètres par division par le coefficient d'emmagasinement global et ajout du niveau de base local.

2.5.6. Retard pour la propagation du débit

L'écoulement calculé à partir de la vidange du réservoir intermédiaire H et des réservoirs souterrains G1 et G2 met un certain temps à arriver à l'exutoire du bassin versant où sont mesurés les débits de la rivière. Dans un petit bassin versant, ou bien si on utilise un grand pas de temps, le débit arrive au cours du pas de temps. En revanche, dans un bassin d'assez grande dimension, ou bien si on utilise un très petit pas de temps, un pas de temps horaire par exemple, l'écoulement peut mettre plusieurs pas de temps pour arriver sous forme de débit à l'exutoire. C'est le « temps de concentration » du bassin versant. Un paramètre de GARDÉNIA, appelé « Retard (propagation) des débits » permet de prendre en compte ce phénomène sous forme d'une ligne de retard, c'est-à-dire d'un décalage temporel. Ce paramètre est exprimé en « nombre de pas de temps ». Par exemple si le pas de temps est journalier et que le retard est égal à 1.8, l'écoulement mettra 1.8 jours à arriver à l'exutoire.

2.5.7. Prise en compte de l'influence de pompages dans la nappe

Pour prendre en compte l'influence des pompages, il faut disposer d'une série de mesure de débits pompés (notés négativement) ou injectés (notés positivement) qui doit être au même pas de temps que celui des pluies. L'unité de débit utilisée pour cette série n'est pas imposée et peut être choisie de manière quelconque. L'influence de la série des pompages (et/ou injections) sur les débits de rivière se fait par l'intermédiaire d'une relation qui fait intervenir trois paramètres. L'influence de ces mêmes débits de pompage sur les niveaux de nappe est calculée par la même relation, mais avec des valeurs différentes de ces trois paramètres. La Figure 31 montre un exemple d'influence de pompage sur un niveau de nappe.

L'influence du pompage sur les débits de rivière est une série de variations de débit qui s'ajoute à la série des débits de rivière calculée à partir des séries climatiques.

L'influence du pompage sur les niveaux de nappe est une série de variations de niveau de nappe qui s'ajoute à la série des niveaux de nappe calculée à partir des séries climatiques.

Pour l'influence de la série de pompages sur les débits de rivière, les paramètres sont :

- Le coefficient d'influence du pompage sur les débits de rivière : ce coefficient caractérise l'amplitude de l'influence des débits pompés ou injectés. La valeur de ce paramètre dépend de l'unité de débit utilisée dans la série des débits pompés.
- Le temps de ½ réaction du débit de la rivière au pompage, selon une loi exponentielle.
- Le temps de ½ stabilisation de l'influence du pompage sur le débit de rivière, selon une loi exponentielle.

Pour l'influence de la série de pompages sur les niveaux de nappe, les paramètres sont :

- Le coefficient d'influence du pompage sur les niveaux de nappe : ce coefficient caractérise l'amplitude de l'influence des débits pompés ou injectés. La valeur de ce paramètre dépend de l'unité de débit utilisée dans la série des débits pompés.

- Le temps de ½ réaction du niveau de la nappe au pompage, selon une loi exponentielle.
- Le temps de ½ stabilisation de l'influence du pompage sur le niveau de la nappe, selon une loi exponentielle.

2.5.8. Description des paramètres hydrologiques du modèle

Les paramètres hydrologiques se divisent en paramètres dimensionnels, coefficients correctifs facultatifs, et éventuellement en paramètres de fonte de la neige et en paramètres contrôlant l'influence de pompages :

Les paramètres hydrologiques dimensionnels.

Ils caractérisent le fonctionnement des différents réservoirs :

- Capacité du réservoir RU de type « réserve utile » ou « réserve disponible pour l'évapotranspiration » : en mm,
- Capacité du réservoir sol progressif : en mm,
- Temps de demi-montée du réservoir G1 (temps de ½ percolation) : en mois,
- Hauteur dans le réservoir H pour laquelle il y a répartition égale entre écoulement rapide et percolation : en mm,
- Temps de demi-tarissement du réservoir G1 : en mois,
- Temps de demi-montée du réservoir G2 (temps de demi-transfert de G1 à G2) : en mois,

ou bien dans le cas d'un seul réservoir souterrain unique avec deux exutoires :

- Seuil de séparation entre les deux exutoires : en mm,
- Temps de demi-tarissement du réservoir G2 (temps de demi-tarissement lent) : en mois,
- Coefficient d'échange souterrain externe : en %,
- Temps de retard (ou temps de concentration) : en pas de temps.

Les coefficients correctifs.

Ils sont destinés à prendre en compte l'éventuelle non-représentativité des entrées telles qu'elles ont pu être estimées, vis-à-vis des conditions météorologiques qui agissent réellement sur le bassin versant :

- Coefficient de correction de la lame d'eau chargé de compenser une mauvaise représentativité des données pluviométriques issues des observations faites sur des stations dispersées : en %,
- Coefficient de correction d'ETP, dont le but est similaire. : en %.

Les paramètres de fonte de neige.

Ils permettent de simuler les divers phénomènes pouvant affecter le stock de neige résultant de précipitations hivernales :

- Constante de correction de la température destinée à tenir compte d'un éventuel écart entre la température moyenne la plus représentative du bassin versant et la température

fournie au modèle à partir d'une pondération effectuée sur les données des stations météorologiques les plus proches : c'est un décalage de température constant : en °C

- Pourcentage de rétention maximale d'eau liquide d'un stock neigeux : en %.
- Coefficient caractérisant la sublimation du manteau neigeux dans une atmosphère où l'ETP n'est pas totalement satisfaite par les apports pluviométriques : en %.

  Un stock de neige, s'il est suffisamment fourni, perd par sublimation un volume d'eau équivalent à Pn . (1 + CSubl / 100) où Pn représente l'ETP résiduelle non satisfaite par la pluie et CSubl est ce coefficient de sublimation.
- Pourcentage de correction de la fonte d'un stock neigeux, par une pluie PN à la température Tempér. La quantité de neige susceptible de fondre par ce phénomène vaut : PN x (1 + CFont / 100) x Tempér / 80 (la chaleur latente de fusion valant 79 calories par gramme arrondie à 80) où CFont est ce facteur correcteur de fonte : en %.
- Seuil de température (proche de 0 °C) au-dessous duquel la neige ne fond plus. Il s'agit en fait d'un terme correctif entre la température de l'air et la température de la neige : en °C.
- « Degré-jour » : C'est la hauteur d'eau équivalente à la quantité de la neige susceptible de fondre quotidiennement (si le stock neigeux est suffisamment fourni) sous l'action d'un excès de température de 1 °C au-dessus du seuil de fonte : en mm/°C/jour.
- Hauteur d'eau équivalente à la quantité de neige susceptible de fondre quotidiennement (si le stock neigeux est suffisamment fourni) sous l'action des calories dégagées par le sol : en 1/10 mm/jour.

Les paramètres d'influence de pompages.

Ils permettent de prendre en compte l'influence d'un pompage ou d'un ensemble de pompages dans la nappe sous-jacente :

- Le coefficient d'influence du pompage sur les débits de rivière : ce coefficient caractérise l'amplitude de l'influence des débits pompés ou injectés. La valeur de ce paramètre dépend de l'unité de débit utilisée dans la série des débits pompés.
- Le temps de ½ réaction du débit de la rivière au pompage : en mois.
- Le temps de ½ stabilisation de l'influence du pompage sur le débit de rivière : en mois.
- Le coefficient d'influence du pompage sur les niveaux de nappe : ce coefficient caractérise l'amplitude de l'influence des débits pompés ou injectés. La valeur de ce paramètre dépend de l'unité de débit utilisée dans la série des débits pompés.
- Le temps de ½ réaction du niveau de la nappe au pompage : en mois.
- Le temps de ½ stabilisation de l'influence du pompage sur le niveau de la nappe : en mois.

En outre, quatre autres paramètres peuvent, sur option, être optimisés par calibration du modèle, à partir de :

- L'équation linéaire qui transforme le niveau du réservoir souterrain du modèle en niveau piézométrique observé.
- L'équation linéaire qui transforme la somme des vidanges des réservoirs du modèle en débit observé à l'exutoire.

Comme expliqué plus haut, ces quatre paramètres sont :

- Le coefficient d'emmagasinement « équivalent » et le niveau de base local, pour la simulation de niveaux piézométriques.
- La superficie du bassin versant et un débit extérieur constant (ce débit extérieur constant est le plus souvent imposé égal à zéro), pour la simulation de débits à l'exutoire.

2.6. CALIBRATION DES PARAMÈTRES DU MODÈLE ET ANALYSE DES RÉSULTATS

2.6.1. Procédure générale

La calibration du modèle se fait par une procédure semi-automatique. L'hydrologue juge de la qualité d'une simulation sur des critères numériques et sur des appréciations visuelles. Son jugement dépend du but qu'il s'est fixé, de l'appréciation de la fiabilité des données ; il contrôle le bilan des différents flux et juge de la vraisemblance des paramètres.

À partir d'un jeu de paramètres fourni par l'utilisateur, le modèle recherche un jeu de paramètres lui permettant d'améliorer un critère numérique de qualité de l'ajustement.

Ce critère est choisi par l'utilisateur ; dans le modèle GARDÉNIA, celui-ci a par exemple la possibilité de donner un poids plus important aux plus faibles valeurs, afin de corriger l'impact prédominant des crues dans les écarts observés.

Néanmoins, ce critère, que le modèle optimise, ne peut prendre en compte l'ensemble des informations dont dispose l'hydrologue : le modèle n'est pas « calibré » par une procédure automatique universelle. Il est calibré par l'utilisateur qui choisit le schéma hydrologique et les paramètres à optimiser, en étant assisté par les algorithmes d'optimisation intégrées au code de calcul.

Cette calibration se déroule donc en plusieurs étapes : l'utilisateur fournit un jeu de paramètres réaliste et décide quels paramètres il accepte d'optimiser, et dans quelles limites, pour améliorer les critères d'ajustement qu'il a choisis. À l'issue d'un certain nombre d'essais (itérations de la procédure de calibration), le modèle fournit une simulation et un jeu de paramètres qui donnent une meilleure valeur du critère d'ajustement choisi.

L'analyse des résultats comporte différents aspects :

- examen graphique : qualité de reconstitution à différentes périodes (hautes eaux, basses eaux) ;
- analyse des bilans, année par année ;
- examen des paramètres obtenus et de leur vraisemblance ;
- analyse des essais successifs par le modèle.

À l'issue de cet examen, l'utilisateur peut :

- intervenir sur des séries de données : un modèle est en effet un excellent outil d'analyse conjointe des données de pluies et de débits et / ou de niveaux piézométriques ; on peut être amené à changer de poste pluviométrique ou à recalculer la lame d'eau ;
- choisir un nouveau jeu de paramètres et modifier les options d'optimisation (paramètres à faire varier, contraintes sur les variations) ;

- changer le schéma de modélisation : les modèles fournissent des simulations représentant le fonctionnement d'un schéma hydrologique donné. Il est tout à fait possible que le schéma choisi ne représente pas le fonctionnement réel de façon satisfaisante. On peut alors, en particulier avec le modèle GARDÉNIA, choisir de nouvelles options de schéma hydrologique (introduction d'un réservoir supplémentaire, d'un seuil, suppression d'une composante d'écoulement, intervention de la gestion d'un stock de neige).

Le choix d'un pas de temps de simulation différent peut également être envisagé, pour éviter des difficultés de calibration dues à des temps de réponse très rapides que l'on ne souhaite pas retenir, ou au contraire pour rechercher dans une approche à pas de temps plus fin, une meilleure représentation des mécanismes.

2.6.2. Conseils d'utilisation

Dans cette démarche, un certain nombre d'erreurs peut être évité si l'on garde à l'esprit ce que l'on peut attendre d'un modèle. Les précautions qui suivent sont absolument essentielles.

- **Longueur de l'historique disponible et temps de mémoire du système**

On ne peut pas identifier sur quelques mois de données des fluctuations interannuelles à longue période de retour. Pour identifier le fonctionnement d'un système, il faut en avoir observé plusieurs cycles hydrologiques. Si cinq ou six ans sont amplement suffisants pour un petit bassin à fort ruissellement, il faut souvent dix à quinze années de mesures pour identifier des fluctuations piézométriques pluriannuelles.

Cela ne signifie pas que, lorsqu'on ne dispose que de cinq ans de données, le système hydrologique n'a pas de longs temps de mémoire. C'est simplement qu'il est illusoire de chercher à les identifier à l'aide d'un modèle, aussi élaboré soit-il. Si on est conduit à réaliser des extensions de données sur un tel bassin, il convient donc d'être extrêmement prudent quant aux valeurs obtenues.

Ce temps de mémoire nécessite, par ailleurs, que toute simulation d'années de calibration soit précédée d'un nombre suffisant d'années de « démarrage » : il s'agit de monter progressivement en régime un système qui comporte des stocks importants. À la date du début des observations, il faut initialiser ces réservoirs.

Des procédures ont été mises au point pour limiter ces années de démarrage à un nombre raisonnable dans le modèle GARDÉNIA. On part alors généralement d'un état qui correspond au régime permanent stationnaire du système ; néanmoins, quelques années de démarrage réelles restent nécessaires après la mise en régime permanent.

- **Interprétation des paramètres et choix des paramètres initiaux**

Malgré les performances des méthodes de recherche utilisées par le modèle, le choix des paramètres initiaux est essentiel. Pour chaque modèle, nous fournissons un guide des valeurs les plus communément rencontrées.

Une difficulté tout à fait classique est l'association des noms de paramètres des modèles avec d'autres concepts. Lorsqu'on parle de « réserve utile » d'un modèle global, il ne s'agit en aucune façon de la réserve utile telle qu'elle est définie par les pédologues ou les agronomes sur une parcelle particulière. Il s'agit d'une réserve globale à l'échelle du bassin, d'un volume

d'eau maximal disponible pour l'évaporation et la transpiration. Trouver une réserve de 300 mm n'est pas une aberration en soi, même si l'on a de bonnes raisons d'évaluer la réserve agronomique à 80 mm.

En revanche, trouver une superficie de bassin versant de 50 km^2 pour un bassin, dont on estime la superficie à 35 km^2, n'est pas acceptable : si l'on considère que l'on connaît bien la superficie du bassin versant (ce qui est très souvent le cas), il n'y a aucune raison de laisser le modèle optimiser ce paramètre, même si l'on obtient alors une simulation plus satisfaisante (sauf dans quelques cas particuliers d'extension de données).

Le nombre de paramètres qu'on laisse optimiser doit être le plus faible possible : en effet, pour des raisons dimensionnelles, il peut parfois arriver que plusieurs jeux de paramètres produisent des simulations quasi-équivalentes (non unicité de la calibration). Ce risque de compensation des paramètres est diminué quand on n'optimise qu'un faible nombre de paramètres.

En effet, si l'on multiplie les pluies, les ETP, les seuils par un même facteur, on obtiendra une simulation identique pour une superficie divisée par ce même facteur (à condition que la composante rapide non linéaire soit peu importante) ; il est donc inutile de modifier ces paramètres simultanément, d'autant plus qu'il est extrêmement rare qu'ils soient tous également incertains.

La procédure de calibration est en général la suivante :

- fixer les paramètres les mieux connus (superficie du bassin, débit extérieur) et optimiser les autres ;
- libérer (sous contraintes) les paramètres fixés précédemment après une calibration satisfaisante : cette deuxième étape permet de prendre en compte le fait qu'aucun des paramètres n'est rigoureusement connu.

Dans le cas d'un bassin mal connu :

- estimer approximativement des paramètres relativement secondaires pour les ordres de grandeurs (temps de tarissements, seuils, etc.) ;
- laisser libres seulement un ou deux paramètres fondamentaux (superficie du bassin pour un système karstique, correction des pluies pour un bassin très montagneux, etc.) qui règlent les principaux ordres de grandeur du bassin et optimiser ;
- libérer progressivement les paramètres initiaux pour affiner la calibration.

Remarque :
Le fait d'optimiser des coefficients correcteurs globaux des différentes entrées (pluies, ETP) peut apparaître comme une solution de facilité. Il est certain que l'on ne peut accepter des corrections très importantes sur chaque type de données sans remettre en cause ou bien leur validité en tant qu'indicateurs des phénomènes physiques réels, ou bien la validité des hypothèses de modélisation.

Cependant, l'élaboration des données d'entrée, comme nous l'avons vu, n'est pas une procédure rigoureuse et définitive : la représentativité des postes pluviométriques n'est pas acquise, la méthode d'interpolation peut être choisie de différentes façons, etc. Pour les ETP, la nature même du phénomène physique et les mesures dont on dispose montrent que celles-ci représentent correctement les fluctuations saisonnières du phénomène, mais peuvent s'écarter de la réalité d'un facteur multiplicatif non négligeable.

C'est pourquoi, dans des limites raisonnables, des corrections peuvent être envisagées pour rechercher l'équilibre du bilan. La démarche conseillée est, dans un premier temps, d'optimiser tous les paramètres - ce qui produira la meilleure calibration possible (qui ne pourra donc pas être dépassée) - puis, dans un deuxième temps, d'imposer progressivement des valeurs fixes aux paramètres.

- **Confiance à accorder à la calibration**

Comment décider qu'une simulation est « satisfaisante » ? Comment en déduire qu'il est acceptable d'utiliser les paramètres calibrés pour des extensions de données ?

Il est difficile de répondre à ces questions de façon générale, d'autant que l'on ne peut jamais assurer la qualité des extrapolations d'une façon strictement déductive (et les exemples de surprise ne manquent pas, pour des raisons qui sont bien souvent explicables *a posteriori*). Néanmoins, quelques règles de bon usage sont nécessaires.

- **Durée des observations**

Il faut disposer de plusieurs cycles de fonctionnement du système. Il faut ajouter à cela qu'il est très souhaitable de disposer d'un historique de données correspondant à des situations variées.

Une calibration faite sur quelques années abondantes, risque de réserver des surprises en année sèche. Néanmoins, il faut insister sur le fait que la nature physique du bilan qui est effectué assure une stabilité importante des résultats pour les simulations de débits (Cela n'est plus vrai pour les simulations avec une calibration uniquement sur des évolutions de niveaux piézométriques).

- **Identification du fonctionnement**

Un modèle présentant des seuils peut tout à fait ne faire fonctionner ces seuils qu'une ou deux fois durant l'historique disponible. Ce sont alors les données de ces dates qu'il convient d'examiner avec le plus grand soin. La précocité de la remontée des débits, en début de saison humide ou en automne pour les climats tempérés, est un bon indicateur de la qualité de fonctionnement de la partie superficielle : une capacité de réservoir superficiel trop grande met trop de temps à se saturer et conduit à un retard bien visible.

La réponse aux épisodes pluvieux isolés de l'étiage est également un très bon test de cette partie du modèle. Mais, il est fréquent que l'on ne puisse pas arriver à une description très satisfaisante : dans ce cas, une estimation de l'impact des erreurs que cela peut occasionner est utile. Elle montre souvent que ces périodes charnières ne jouent qu'un rôle marginal dans le bilan d'ensemble : le modèle est alors utilisable pour des évaluations de ressources, l'analyse du potentiel hydroélectrique, etc., mais il faudra noter que les statistiques de débit des mois concernés ne seront pas bien évaluées.

La séparation de l'écoulement entre ces différentes composantes doit être vérifiée graphiquement. Il faut faire attention à l'influence du pas de temps sur ces constantes de temps : des données mensuelles décroîtront en étiage avec des temps caractéristiques de l'ordre de deux à trois mois. Mais au pas de temps journalier, ce tarissement moyen apparaîtra comme la superposition de deux composantes, l'une relativement rapide, l'autre plus lente.

Là encore, de telles remarques ne mettent pas nécessairement en cause la fiabilité du modèle : tout dépend de l'utilisation. On notera en particulier qu'il est illusoire de croire mieux identifier le fonctionnement d'un bassin sur trois ans de données journalières (environ 1 000 valeurs) que sur trois ans de données mensuelles (36 valeurs). Dans le premier cas, on identifie mieux les réactions rapides, mais les variations lentes sont souvent cachées par la variabilité des phénomènes rapides.

L'introduction du mécanisme de la fonte de la neige présente les mêmes écueils. Le stockage neigeux sera correctement identifié uniquement s'il est observé plusieurs fois et conduit à un effet sensible sur les débits des mois concernés.

La règle est donc qu'un modèle peut être considéré comme correctement ajusté quand toutes ses composantes ont fonctionné plusieurs fois en conduisant à des effets notables et corrects sur les simulations.

- **Interprétation du bilan**

Un modèle n'est jamais, au mieux, qu'une représentation acceptable de la relation entre ses entrées et ses sorties. Il est donc toujours périlleux d'aller chercher dans son mécanisme interne un flux ou un stock particulier et de l'identifier à un flux ou un stock physique du système.

De même la séparation entre écoulement rapide et écoulement lent ne doit pas être identifiée sans précautions comme une séparation entre écoulement superficiel et écoulement souterrain. En effet :

- d'une part un écoulement peut toujours être décomposé en deux composantes, mais cette décomposition n'est pas forcément unique et elle dépend de la formulation du modèle. En d'autres termes, un autre modèle, ou un autre jeu de paramètres, pourrait produire des résultats comparables en terme de qualité de reproduction des débits et / ou des niveaux de nappe, mais une décomposition extrêmement différente ; En pratique ce risque est diminué qhand le modèle est calibré simultanément sur une série de débits à l'exutoire et sur une série de niveaux piézométriques de nappe.
- d'autre part, on peut affirmer que l'écoulement lent est … plus lent que l'écoulement rapide, mais il n'y a pas de certitude qu'il s'agisse réellement d'écoulement souterrain.

En revanche, un modèle peut être un bon moyen d'évaluer les apports efficaces annuels. En effet, lorsque les temps de mémoire du système sont relativement brefs (peu de reports inter annuels), les apports efficaces calculés par le modèle sont des données de débits corrigées des effets de report d'un mois ou d'une saison à l'autre.

Flux unique entre les entrées et la sortie, ces apports efficaces sont correctement identifiés, à condition que la calibration soit correcte. Le risque en effet est que le modèle, auquel on aurait laissé le choix de la superficie du bassin versant, trouve une calibration erronée ; évaluant des pluies trop élevées (par exemple pour répondre correctement à des pointes de crues dans une phase de son fonctionnement), il adopte une capacité de réservoir superficiel suffisante et corrige la trop grande abondance des apports par une réduction de la superficie du bassin. Ainsi, dans ce cas, si le volume global au niveau du bassin est respecté, l'apport efficace par unité de superficie du bassin est erroné.

- **Difficultés particulières en cas de calibration uniquement sur des observations de niveaux piézométriques**

Il est possible de calibrer (caler) les paramètres du modèle GARDÉNIA à partir uniquement d'une série d'observations de niveaux piézométriques, sans série d'observation de débits de rivière. Cependant cette pratique présente des risques. En effet le niveau piézométrique est relié par une relation linéaire au niveau dans le réservoir souterrain du modèle GARDÉNIA.

C'est alors l'inverse du coefficient d'emmagasinement qui joue alors le rôle de facteur d'amplitude, (comme la superficie du bassin versant dans le cas d'un calcul de débit de rivière).

Ceci peut poser quelques difficultés particulières :

- le coefficient d'emmagasinement n'est pas connu, même en ordre de grandeur, aussi bien que l'est généralement la superficie du bassin versant. En effet, il s'agit d'un coefficient d'influence globale des fluctuations de stock sur un niveau piézométrique particulier.

  Ce coefficient d'influence correspond au coefficient d'emmagasinement moyen de la nappe, uniquement si le point d'observation est situé loin de tout cours d'eau.

  Ce coefficient ne peut donc pas être relié aisément à des interprétations de pompages d'essai dont la validité reste locale et qui très souvent sont réalisés sur de courtes périodes et peuvent donner un coefficient d'emmagasinement de nappe captive. Le coefficient d'emmagasinement de GARDÉNIA correspond plus à des variations de niveaux sur des périodes beaucoup plus longues et le type de coefficient d'emmagasinement à prendre en compte est celui d'une nappe libre. Par ailleurs, le coefficient d'emmagasinement au sens traditionnel, est le plus souvent défini avec une précision très inférieure à 20 %, alors que des écarts de 20 % dans le bilan sont difficilement acceptables.

  Dans le cas de calibration uniquement sur une série d'observations de niveaux piézométriques, le bilan qui est réalisé ne doit donc être interprété comme une analyse de flux qu'avec d'extrêmes précautions. Bien que ce soit une méthode d'analyse un peu dangereuse des apports efficaces, c'est souvent la seule disponible et il ne convient pas de la rejeter *a priori* ;

- des temps de mémoire très longs sont fréquents. Les difficultés de leur identification sont donc plus importantes que pour les débits. Ces temps influent sur les autres paramètres (niveau de base et coefficient d'emmagasinement en particulier).

-

3. Notice d'utilisation du code de calcul GARDÉNIA

3.1. INSTALLATION DE GARDÉNIA SOUS ENVIRONNEMENT WINDOWS

3.1.1. Distribution

La distribution de GARDÉNIA sous Windows se fait à partir d'un exécutable « setup_Gardenia.exe » permettant l'installation automatique. L'installation met en place :

- Tous les exécutables et fichiers nécessaires au fonctionnement de GARDÉNIA (code de calcul GARDÉNIA et utilitaires : Shalimar, Etpturc).
- Une documentation présentant :
  · les principaux concepts théoriques,
  · le guide d'utilisation, un didacticiel, un fichier d'aide.

Remarque :
Ce code de calcul bénéficie de la protection légale accordée aux logiciels. L'utilisateur peut faire des copies de sauvegarde, mais le code de calcul doit être utilisé uniquement sur une seule machine à un moment donné.

Si après avoir lu ce manuel et utilisé GARDÉNIA, vous souhaitez contacter le BRGM pour des remarques, des questions ou des suggestions, vous pouvez envoyer un mail à l'adresse internet : gardenia@brgm.fr

Ou bien vous pouvez adresser un courrier à l'adresse suivante :

Logiciel GARDÉNIA
BRGM – Direction D3E / GDR
BP 6009
45060 Orléans Cedex 2
France

3.1.2. Caractéristiques et configuration du matériel nécessaire

Le code de calcul GARDÉNIA a été conçu pour fonctionner sur tout micro-ordinateur fonctionnant sous environnement Windows XP, Vista, Windows 7, Windows 8, présentant les caractéristiques minimales suivantes :

- une capacité de mémoire RAM de 1.5 Go minimum.
- éventuellement un lecteur de clé USB pour l'installation.

L'espace nécessaire sur le disque dur doit être d'au moins 30 Mo pour l'installation complète de GARDÉNIA avec la documentation.

3.1.3. Installation de GARDÉNIA

L'installation de GARDÉNIA se fait en double-cliquant sur le fichier d'installation « setup_Gardenia.exe ».

3.1.4. Exécution

Une fois l'installation terminée, le lancement du code de calcul se fait à partir du menu « Démarrer » ou « Programmes ». Lors de l'installation il est possible de créer sur le « Bureau de Windows » un raccourci de l'exécutable **Gardenia.exe**. Il suffit alors de double-cliquer sur l'icône de ce raccourci pour lancer l'exécution. Il est également possible de déposer (par « glisser déplacer ») un fichier projet [.rga] sur cette icône pour exécuter ce fichier projet.

3.2. LES FICHIERS NÉCESSAIRE À L'UTILISATION DE GARDÉNIA

Les données climatiques et hydrologiques et les paramètres sont tous sur des fichiers séparés. Les fichiers nécessaires à l'utilisation de GARDÉNIA sont les suivants :

- un fichier pour les paramètres de départ du modèle ;
- un fichier pour la pluie ;
- un fichier pour l'évapotranspiration potentielle ;
- éventuellement un fichier pour les débits de prélèvements ou d'injections
- éventuellement un fichier pour les données de température de l'air (s'il y a lieu de modéliser la fonte de la neige) ;
- éventuellement un fichier pour les données d'équivalent en eau des précipitations neigeuses ;
- éventuellement un fichier pour les données de débits observés à l'exutoire du bassin : pour la calibration des paramètres.
- éventuellement un fichier pour les données de niveaux observés d'un piézomètre situé dans le bassin : pour la calibration des paramètres.

Le pas de temps de chaque série doit être constant, mais chaque série peut avoir un pas de temps différent des autres. Classiquement, on utilisera un pas de temps journalier pour chaque série, mais on pourrait également avoir la configuration :

- une série de pluie journalière ;
- une série d'évapotranspiration potentielle mensuelle ;
- une série de débits décadaires.

Dans tous les cas où les pas de temps sont différents, le pas de temps le plus fin doit être celui de la pluie car les calculs de bilan sont effectués au pas de temps de la pluie. Les pas de temps possibles sont :

- un pas de temps journalier ;
- un pas de temps décadaire (10 jours) ;
- un pas de temps mensuel ;
- un pas de temps « autre » définit par l'utilisateur (par exemple : 1 heure, ou 15 minutes).

Remarque :

Il est possible de traiter simultanément plusieurs bassins à la fois. Les données de pluies des différents bassins seront placées les unes après les autres dans un même fichier, de même pour les fichiers d'ETP, de températures, de débits de rivière et de niveaux de nappe.

3.3. DÉROULEMENT D'UNE SIMULATION

Une simulation se déroule en affichant successivement différentes boites de dialogue (Figure 11 à Figure 30). La description de celles-ci est indiquée dans les paragraphes suivants pour un exemple de simulation simple. Le didacticiel de GARDÉNIA (Thiéry, 2013) présente la mise en œuvre pratique de nombreuses autres modélisations dans des contextes variés.

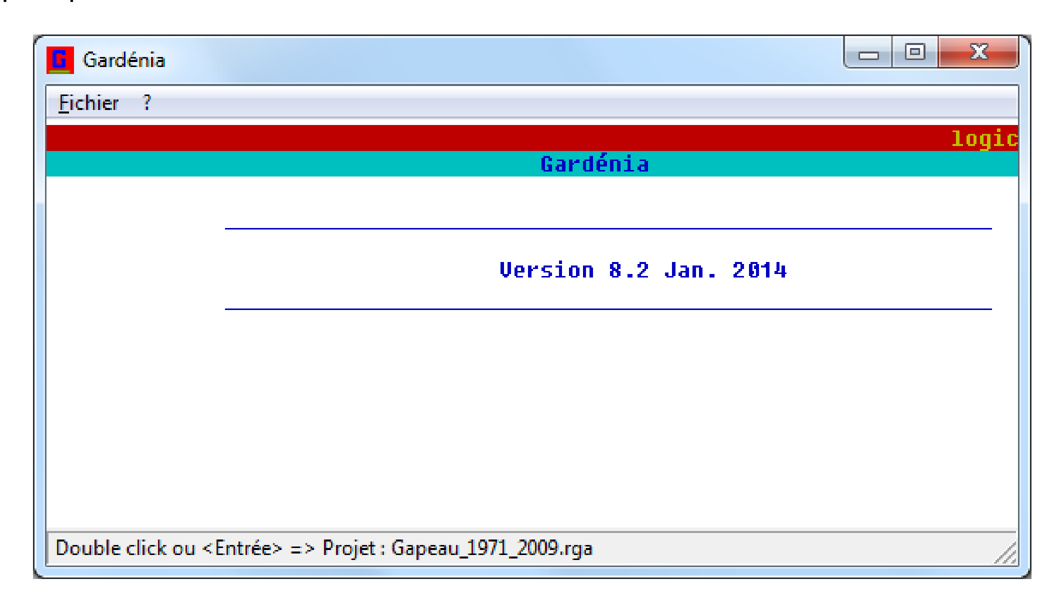


Figure 11 - Début d'une simulation avec le code de calcul GARDÉNIA.

3.3.1. Réutilisation d'un fichier projet

Si on a déjà fait un premier calcul, les noms des fichiers utilisés ont été enregistrés dans un fichier « projet » dont le nom à pour extension [.rga].

- On peut alors réaliser un autre calcul avec d'autres fichiers de données en utilisant le menu « Fichier -> Modifier » (ou bien le menu « Fichier -> Nouveau » puis choix « Modifier un fichier projet ».
- On peut réutiliser un fichier projet par le menu « Fichier -> Ouvrir » ou bien en activant un des huit « fichiers récents » affichés (Figure 12).
- On peut en particulier réutiliser le dernier fichier projet utilisé pour réaliser un complément de calibration.

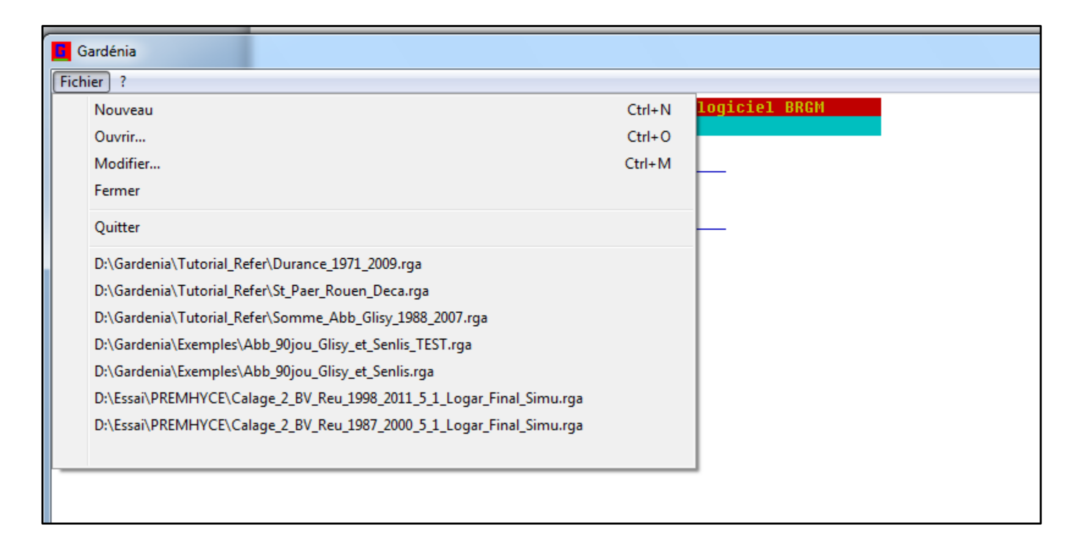


Figure 12 - Menu Fichier (Nouveau, Ouvrir, Fermer, Récents).

3.3.2. Création d'un nouveau projet

Modification d'un projet ou création d'un nouveau projet (Figure 13 à Figure 15).

Le nom du nouveau fichier projet (ici « Mon_Projet.rma ») est défini Figure 14.

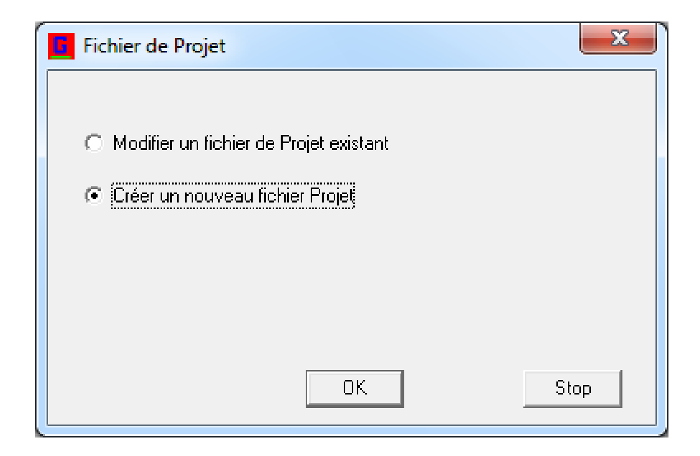


Figure 13 – Création d'un nouveau projet.

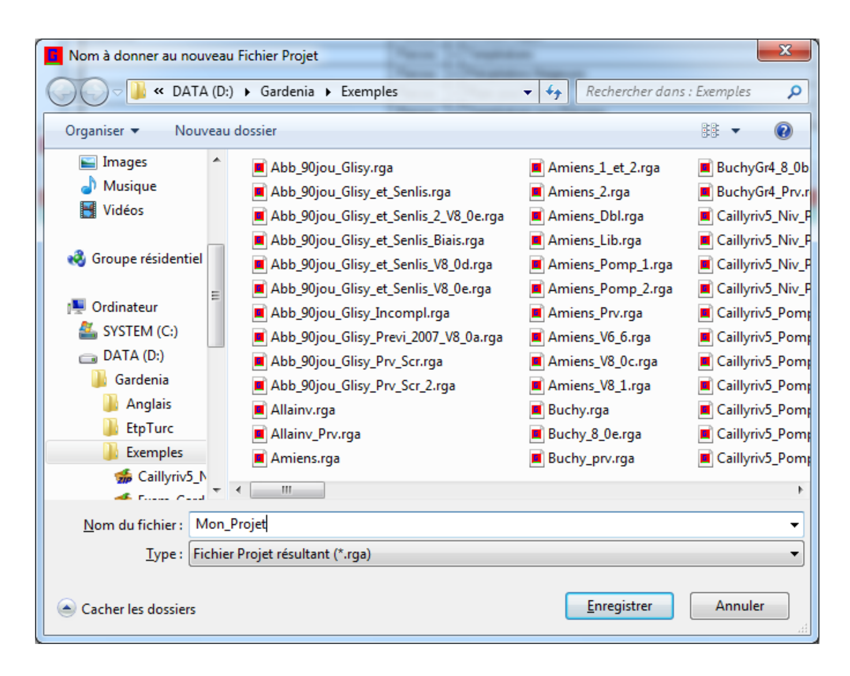


Figure 14 - Définition du nom à donner au nouveau fichier projet.

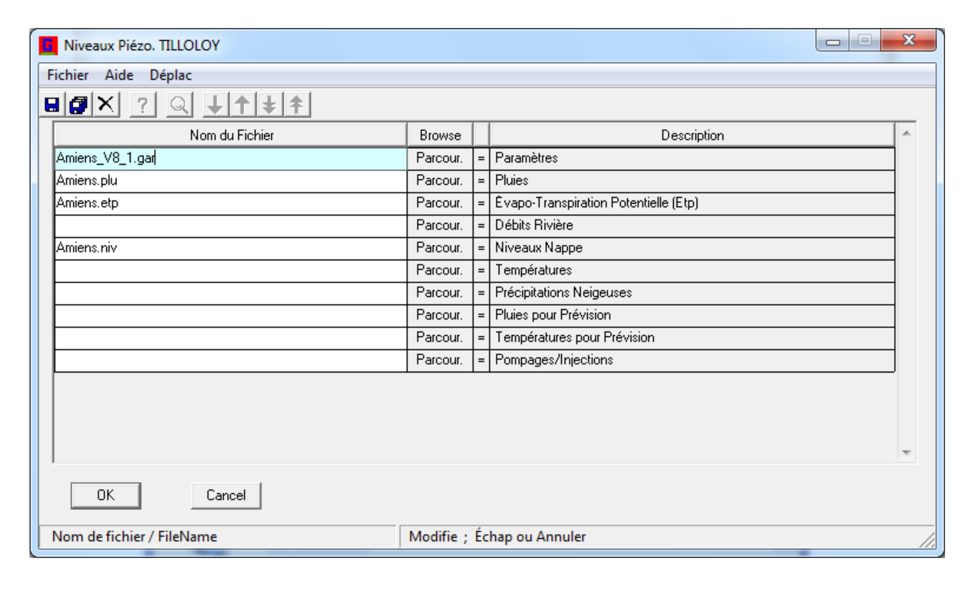


Figure 15 – Modification d'un projet existant.

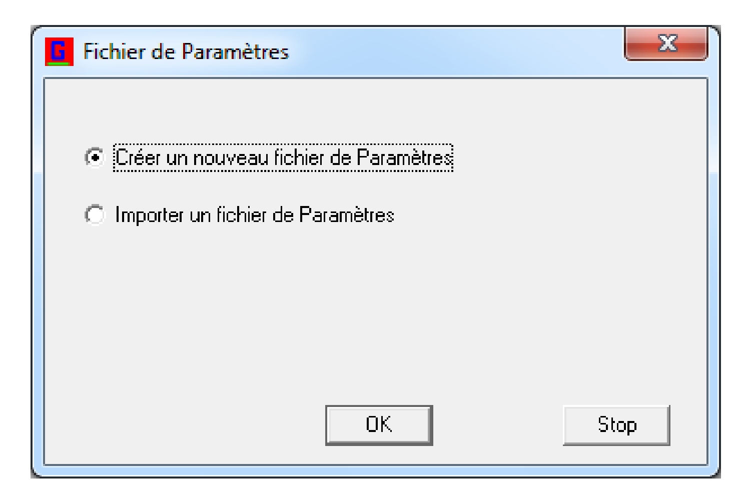


Figure 16 - Création d'un fichier de paramètres [.gar] ou bien réutilisation d'un fichier existant.

Lors de la création d'un nouveau projet :

- Soit l'utilisateur ne dispose pas d'un fichier de paramètres déjà constitué (Figure 16), il doit donner en interactif les valeurs de toutes les options et de tous les paramètres, ce qui peut être assez long, mais est nécessaire pour une première utilisation.

  GARDÉNIA crée un fichier de paramètres du même nom que celui choisi pour le fichier projet, mais avec l'extension [.gar] : dans notre exemple : Mon_Fichier.gar.

- Soit l'utilisateur dispose d'un fichier de paramètres existant, dont il devra préciser le nom (Figure 17). Les valeurs des options et des paramètres hydrologiques sont lues dans ce fichier.

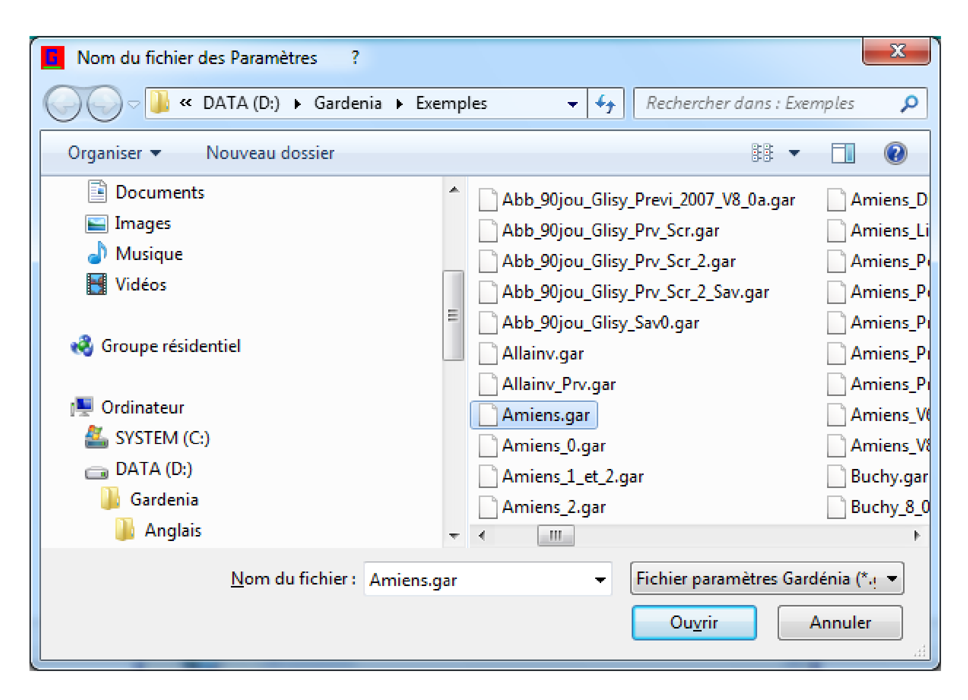


Figure 17 - Importation d'un fichier de paramètres existant (ici : Amiens.gar).

Après chaque passage, et en particulier après une première utilisation où l'on a donné tous les paramètres, un fichier de paramètres actualisés est créé sous le nom de « gardepara.out ». Il peut alors être utile de sauvegarder ce fichier en le renommant ; ce fichier pourra être utilisé :

- pour un complément de calibration si nécessaire (il n'y aura plus à redonner les valeurs de tous les paramètres et options) ;
- pour calculer des débits et / ou des niveaux (extension de données), à partir de séries climatiques observées (ou générées) si la calibration est jugée comme satisfaisante.

Remarque :
Les différents paramètres des boites de dialogue sont décrits dans les paragraphes suivants.

3.3.3. Titre descriptif de la simulation

En début de simulation, le code de calcul demande de donner un titre pour la simulation (Figure 18). Ce titre est une ligne de commentaires qui figurera dans les fichiers en sortie de GARDÉNIA et sur les éventuels graphiques. C'est un élément de traçabilité important.

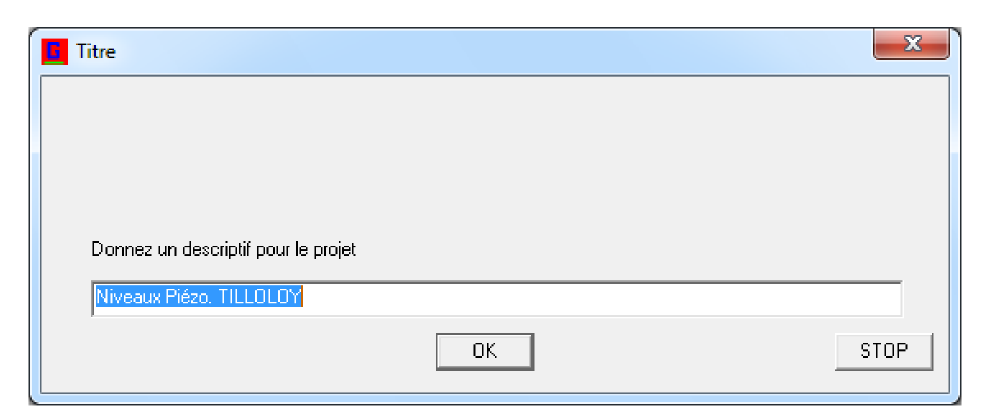


Figure 18 - Définition du titre descriptif de la simulation.

3.3.4. Pré-options (Figure 19)

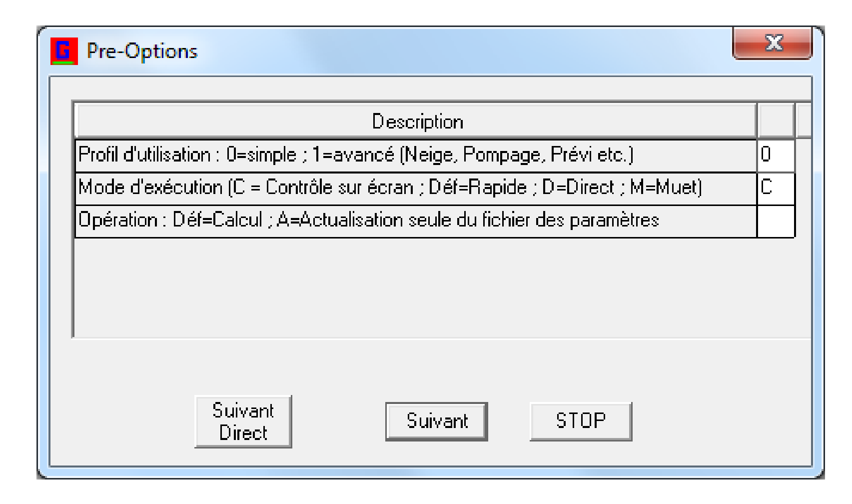


Figure 19 - Définition ou modification des pré-options.

L'utilisation avancée permet en particulier de prendre en compte la fonte de la neige, l'influence de pompages dont on connait le débit, ou de réaliser des prévisions. Elle permet également de choisir des options moins souvent utilisées (années hydrologiques, prévision) ou des schémas particuliers (plusieurs composantes souterraines par exemple).

Le mode d'exécution permet de sélectionner :

- Une exécution conversationnelle, avec possibilité de vérifier et modifier les paramètres.
- Une exécution directe avec arrêt à chaque bassin.
- Une exécution muette, sans intervention de l'utilisateur.

L'opération d'actualisation permet d'actualiser un fichier des paramètres, sans aucun calcul : Un nouveau fichier des paramètres, de nom « gardepara.out » est alors généré.

Ce nouveau fichier des paramètres est au format le plus récent de GARDENIA. Il intègre donc la possibilité d'utiliser les fonctionnalités les plus récentes.

Par précaution il est cependant conseillé de renommer ce fichier avant de l'utiliser.

3.3.5. Noms des fichiers à lire

En cas de création d'un nouveau projet, les noms des fichiers de pluie, d'ETP, de température de l'air (pour les calculs avec fonte de neige) et d'observations de débits et / ou de niveaux, sont sélectionnés par des boites de dialogue classiques (Figure 20).

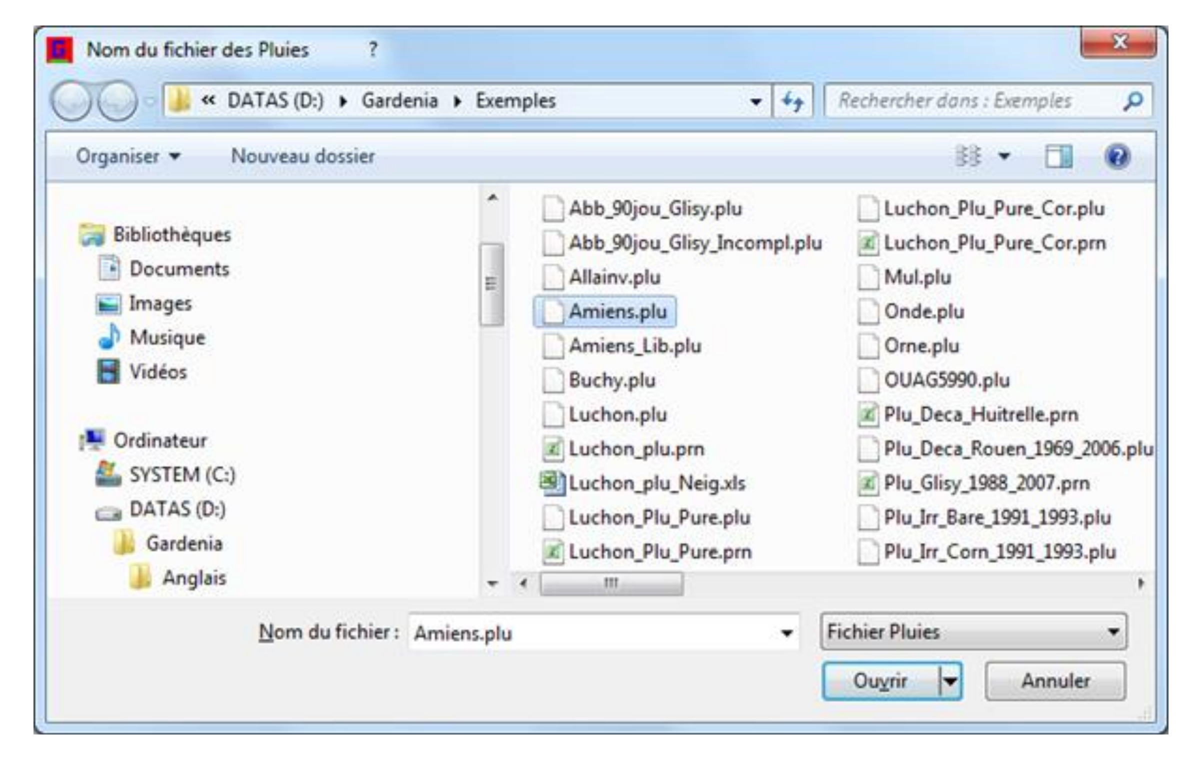


Figure 20 - Nouveau projet : définition du fichier des pluies (et des autres fichiers hydroclimatiques).

Le format de ces fichiers est décrit plus loin. La constitution de ces fichiers selon ce format est facilitée par l'utilisation du module « Shalimar » dont le fonctionnement est décrit brièvement plus bas.

Les données d'ETP peuvent être acquises auprès de Météo-France. Il est également possible, à l'aide module « Etpturc » décrit plus loin, de calculer des ETP au pas de temps journalier, décadaire ou mensuel selon la formule mensuelle de Turc (Turc 1961) à partir des températures mensuelles et des durées mensuelles d'insolation (ensoleillement) et éventuellement de l'humidité relative.

3.3.6. Options générales (Figure 21)

Ce sont des options, définies par des nombres entiers, qui s'appliquent à tous les bassins. Par défaut, en cas de choix simple : 1 ⇔ Oui ; 0 ⇔ Non.

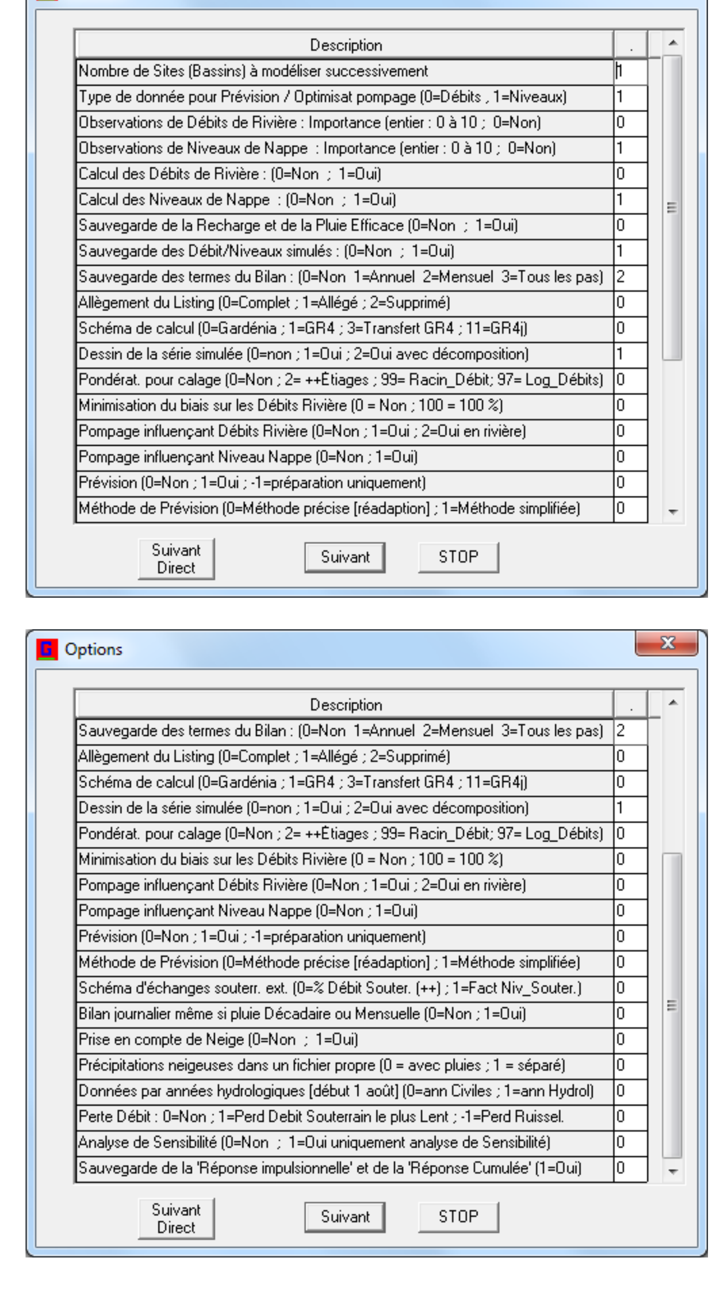


Figure 21 - Définition ou modification des options de calcul.

- **<u>Importance attribuée aux observations de débits de rivière</u>**
  C'est un nombre entier qui définit l'importance relative pour la calibration, attribuée aux observations de débits de rivière :
  0 = Pas de série temporelle d'observations de débits de rivière
  1 à 10 = Poids relatif de 1 à 10 à comparer au poids éventuel d'observations de niveaux de nappe.
  S'il y a uniquement des observations de débits de rivière : il suffit de donner un poids égal à 1.

- **<u>Importance attribuée aux observations de niveaux de nappe</u>**
  C'est un nombre entier qui définit l'importance relative pour la calibration, attribuée aux observations de niveaux de nappe :
  0 = Pas de série temporelle d'observations de niveaux de nappe
  1 à 10 = Poids relatif de 1 à 10 à comparer au poids éventuel d'observations de débits de rivière.
  S'il y a uniquement des observations de niveaux de nappe : il suffit de donner un poids égal à 1.

  Le poids est <u>relatif</u>. Par exemple si on donne un poids de 4 aux observations de débits de rivière et un poids de 2 aux observations de niveaux de nappe : les débits de rivière auront deux fois plus de poids que les niveaux de nappe. Le poids sera donc de 66.7 % pour les débits de rivière et de 33.3 % pour les niveaux de nappe.

- **<u>Calcul des débits de rivière</u>**
  0 = Non : Pas de calcul.
  1 = Oui : Calcul des débits de rivière.
  Il est possible de demander le calcul des débits même si on n'a pas d'observations de débits.
  Par défaut, quand on a des observations de débits, le modèle calculera aussi les débits.

- **<u>Calcul des niveaux de nappe</u>**
  0 = Non : Pas de calcul.
  1 = Oui : Calcul des niveaux de nappe.
  Il est possible de demander le calcul des niveaux de nappe même si on n'a pas d'observations de niveaux.
  Par défaut, quand on a des observations de niveaux, le modèle calculera aussi les niveaux.

- **<u>Sauvegarde sur fichier de la recharge et de la pluie efficace calculées</u>**
  0 = Non : Pas de sauvegarde.
  1 = Oui : Sauvegarde de la recharge à la nappe et de la pluie efficace.

  La <u>recharge</u> est la fraction de la pluie qui alimente le réservoir souterrain représentant la nappe. C'est donc la fraction de la pluie restant après action de l'évapotranspiration, et après soustraction du flux de ruissellement et percolation. Si la sauvegarde est demandée, la recharge calculée sera sauvegardée dans le fichier de nom « garde_rech_peff.prn » importable directement dans Excel © ou son équivalent. (Elle sera également sauvegardée dans le fichier « garderech.out ».)

La pluie efficace, est la fraction de la pluie restant après action de l'évapotranspiration dans le réservoir sol. Si la sauvegarde est demandée, la pluie efficace calculée sera également sauvegardée dans le fichier de nom « garde_rech_peff.prn » importable directement dans Excel © ou son équivalent. (Elle sera également sauvegardée dans le fichier « gardepef.out ».)

- **Sauvegarde des débit de rivière et / ou des niveaux de nappe simulés**
  0 = Non : Pas de sauvegarde.
  1 = Oui : Sauvegarde des débits de rivière et / ou des niveaux de nappe simulés.
  > Il est possible de demander la sauvegarde des débits de rivière simulés et / ou des niveaux de nappe simulés. Si la sauvegarde est demandée, les débits de rivière simulés et / ou des niveaux de nappe simulés seront sauvegardés dans le fichier de nom « gardesim.prn » importable directement dans Excel © ou son équivalent. (Elle sera également sauvegardée dans le fichier « gardesim.out ».)
  > Quand on calcule à la fois les débits de rivière et les niveaux de nappe, le fichier « gardesim.prn » présente en premier lieu les débits de rivière simulés à toutes les dates, puis les niveaux de nappe simulés à toutes dates.

- **Sauvegarde des termes du bilan hydroclimatique**
  0 = Non : Pas de sauvegarde
  1 = Sauvegarde des termes du bilan de chaque année
  2 = Sauvegarde des termes du bilan au pas de temps mensuel.
  (Si la simulation se fait au pas de temps décadaire ou au pas de temps de 5 jours, le pas de temps pour la sauvegarde n'est pas exactement mensuel mais sur un multiple du pas de temps, proche du mois.)
  3 = Sauvegarde des termes du bilan à chaque pas de temps.
  Les termes du bilan hydroclimatique sont sauvegardés dans le fichier « bilmens.prn ».

- **Pondération appliquée sur les écarts de débits de rivière pour la calibration**
  0 = Pas de pondération : Minimisation des écarts sur les débits naturels.
  99 = Minimisation des écarts sur la racine carrée des débits.
  Favorise les étiages. Donne moins d'importance aux forts débits.
  97 = Minimisation des écarts sur le logarithme (décimal) des débits.
  Favorise fortement les étiages.
  98 = Minimisation des écarts sur l'inverse des débits.
  Favorise énormément les étiages. (*Peu utilisée*).
  96 = Minimisation des écarts sur la racine cinquième des débits.
  Favorise fortement les étiages. (*Pour mémoire*).
  2 = Donne un peu plus de poids aux étiages (*Pour mémoire*).

  > La prise en compte de l'écart sur la racine carrée des débits (option 99) donne généralement de bons résultats.
  > Si on s'intéresse exclusivement aux étiages, l'écart sur le logarithme des débits (option 97) peut être plus adapté.

- **Poids sur la minimisation du biais de la simulation des débits de rivière**
  > Le biais sur les débits simulés est l'écart entre la moyenne du débit simulé et la moyenne du débit observé.
  > Quand on donne un poids au biais sur le débit simulé, la calibration essaie simultanément de maximiser le coefficient d'ajustement sur les débits et les niveaux (coefficient de Nash, 1970) et de minimiser le biais sur la simulation des débits. Le poids sur la minimisation du biais est le poids qui est affecté au biais.

> Ce poids est exprimé en pourcent.
> Un poids de 5 % à 10 % donne souvent de bons résultats.
0 = Non : Pas de minimisation du biais sur les débits simulés.
x = Poids de x % (par exemple « 5 » => Poids de 5 %).
> Le détail de la minimisation du biais est décrit en Annexe.

- **<u>Sauvegarde de la 'réponse impulsionnelle' et de la 'réponse à un échelon'</u>**
  0 = Non : Pas de sauvegarde.
  1 = Oui : Sauvegarde de la 'réponse impulsionnelle' et de la 'réponse à un échelon'.

  Pour l'influence de la <u>pluie efficace</u> :
  > La réponse impulsionnelle est calculée comme la réponse à une pluie efficace isolée de 100 mm pendant un seul pas de temps.
  > La réponse à un échelon est calculée comme la réponse à une pluie efficace continue de 1 mm par pas de temps.

  Pour l'influence d'une série de <u>débits de pompages</u> :
  > La réponse impulsionnelle est calculée comme la réponse à un pompage pendant un seul pas de temps, avec un débit de 100 unités de débit de pompage.
  > La réponse à un échelon est calculée comme la réponse à un pompage continu de 1 unité de débit de pompage par pas de temps.

Options Générales pour une utilisation avancée

Si on a choisi un profil d'« utilisation avancée » les options générales suivantes peuvent être sélectionnées :

- **<u>Nombre de bassins à modéliser successivement</u>**
  > Il est possible de modéliser simultanément, dans un même projet, plusieurs bassins versants. Ces bassins auront tous ces mêmes options générales.
  > S'il y a plusieurs bassins versants, chacun sera simulé indépendamment des autres, avec sa lame d'eau et d'évapotranspiration potentielle, et avec ses paramètres. Les résultats seront identiques à ceux qui seraient obtenus si on créait un projet pour chaque bassin.
  > Cependant le regroupement de plusieurs bassins dans un même projet permet une mise en œuvre plus simple, avec beaucoup moins de fichiers. L'intérêt est surtout d'obtenir une comparaison des paramètres des bassins et des bilans hydrologiques des bassins sous forme de tableaux synthétiques.
  > Par défaut : le projet comprend uniquement un seul bassin.
  > S'il y a plusieurs bassins, les paramètres concernant les différents bassins seront regroupés dans un seul fichier de paramètres, à la suite les uns des autres. Il en sera de même pour les données de pluie, d'ETP, de débits, de niveaux.

- **<u>Type de donnée pour la prévision ou l'édition des bilans</u>**
  0 = Débits de rivière.
  1 = Niveaux de nappe.

- **<u>Allègement du fichier « Listing »</u>**
  0 = Listing complet : Pas d'allègement.
  1 = Listing allégé.
  2 = Listing supprimé.

Le listing, quand on ne demande pas sa suppression, a pour nom : « gardelis.txt ». Il peut être visualisé par tout éditeur de texte, par exemple par l'application « Notepad » ©.
Lors d'une première simulation, ou en cas de difficultés, il est conseillé de demander un listing complet pour vérifier les données introduites.

- **Schéma de calcul hydrologique**
  0 = Schéma Gardénia (par défaut).
  1 = Schéma GR4 (Irstea). *Pour mémoire*.
  3 = Schéma Gardénia, mais transfert selon le schéma GR4. *Pour mémoire*.
  11 = Schéma GR4J (Irstea). *Pour mémoire*.

- **Dessin de la série simulée**
  0 = Non : Pas de dessin de la série simulée.
  1 = Oui : Dessin de la série simulée (et observée si elle existe).
  2 = Oui : Dessin et, en cas de simulation de débits, avec également dessin de la composante souterraine du débit.

- **Pompage influençant les débits de rivière**
  0 = Non : Pas de pompage influençant les débits de rivières.
  1 = Oui : Pompage influençant les débits de rivières.
  2 = Oui : Pompage en rivière influençant les débits de rivières (*Peu utilisé*).

- **Pompage influençant les niveaux de nappe**
  0 = Non : Pas de pompage influençant les niveaux de nappe.
  1 = Oui : Pompage influençant les niveaux de nappe.

- **Calculs avec prévision**
  0 = Non : Pas de calculs avec prévision.
  1 = Oui : Calcul avec prévision de débits de rivière ou de niveaux de nappe.
  -1 = Oui : Calcul avec prévision, mais uniquement préparation de la prévision, c'est-à-dire calcul des paramètres de prévision.

- **Méthode de prévision**
  0 = Par défaut méthode précise avec réajustement optimal des niveaux des réservoirs du modèle.
  1 = Méthode simplifiée (*pour mémoire*).

- **Schéma d'échange souterrain avec l'extérieur du bassin**
  0 = Schéma conseillé : En pourcentage du débit souterrain.
  1 = Schéma (*pour mémoire*) avec un facteur sur le niveau souterrain.

- **Bilan journalier même si on dispose de pluies décadaires ou mensuelles**
  0 = Non : Par défaut le bilan est effectué au pas de temps de la série des pluies.
  1 = Oui : Bilan journalier en divisant la pluie par le nombre de jours dans le pas de temps.

- **Prise en compte de neige**
  0 = Non : Pas de prise en compte de la neige. Pas d'utilisation du fichier de températures de l'air.
  1 = Oui : Prise en compte de la fonte de la neige, utilisation du fichier de températures de l'air.

- **<u>Précipitations neigeuses dans un fichier propre</u>**
  0 = Uniquement un fichier de précipitations intégrant la neige éventuelle.
  1 = Il y a un fichier spécifique pour les précipitations neigeuses.

- **<u>Données par années hydrologiques [début 1er août] ou par années civiles</u>**
  0 = Les séries temporelles sont données par années civiles (commençant le 1er janvier).
  1 = Les séries temporelles sont données par années hydrologiques (commençant le 1er Août).

- **<u>Perte de la composante souterraine du débit</u>**.
  0 = Non : Pas de perte de débit souterrain.
  1 = Oui : La composante la plus lente du Débit Souterrain n'est pas prise en compte dans le débit calculé.
  -1 = Perte de l'écoulement rapide (ruissellement). Le débit calculé intègre uniquement le débit souterrain.

- **<u>Analyse de sensibilité (*Obsolète*)</u>**
  0 = Non : Pas d'analyse de sensibilité.
  1 = Oui : Uniquement analyse de sensibilité.

- **<u>Données de tous les sites dans différentes colonnes d'un même fichier</u>**
  Ce paramètre permet d'utiliser des fichiers « Excel_Date » avec plusieurs colonnes de données, chaque colonne correspondant à un bassin (ou un site).

  Pour chaque bassin on peut choisir le numéro de la colonne, la même pour chaque fichier de données, (fichier des débits de rivière, des pluies, des ETP, des températures, des précipitations neigeuses, des pompages) dans laquelle seront lues les données.
  Par exemple on peut choisir que les données du bassin n°1 sont lues dans la colonne n°1 des fichiers (de débits, de pluies, d'ETP, de températures, de neige, de pompages), les données du bassin n°2 seront lues dans la colonne n°7, les données du bassin n°3 seront lues dans la colonne n°5, etc.

  La date est toujours placée dans la colonne n°1, et les numéros de colonne s'entendent comme les numéros sans compter la colonne de la date (la colonne n°1 est la 1ère colonne de données, donc en réalité la 2ème colonne du fichier).

  Si les périodes d'observations des bassins n'ont pas toutes la même longueur, on veillera à prolonger les périodes les plus courtes pour permettre au code de calcul d'accéder dans tous les cas aux colonnes les plus éloignées, sans être perturbé par des champs vides.

  Avec cette option il est ainsi possible de modéliser facilement 400 bassins avec un seul fichier de pluies de 400 colonnes (en plus de la colonne de la date).

  0 = Présentation par défaut des données dans les fichiers de type Excel_Date.
  Il n'y a qu'une seule colonne de données. Les données de chaque bassin, quand il y en a plusieurs, sont placées les unes après les autres.
  ou bien :
  Présentation si les données ne sont pas au format Excel_Date.
  1 = Pour chaque bassin on précisera, dans les options du bassin, le numéro de la colonne des fichiers dans laquelle seront lues les données.

- **Numéro de la 'colonne' des Pluies : Déf = 0 <=> 1ère colonne de données**
  Ce paramètre permet d'utiliser des fichiers « Excel_Date » avec plusieurs colonnes de données, chaque colonne correspondant à un type de donnée.

  Quand on modélise un bassin : on a la possibilité de regrouper tous les types de données hydroclimatiques de ce bassin dans les différentes colonnes d'un fichier unique.
  Par exemple on peut avoir les pluies dans la colonne n°1, les ETP dans la colonne n°3, les pompages dans la colonne n°7, les débits de rivière dans la colonne n°5, et les niveaux de nappe dans la colonne n°6.
  On a ainsi un seul fichier contenant toutes les données hydroclimatiques au lieu d'avoir de 3 à 7 fichiers de données hydroclimatiques.

  Si on choisit cette option, dans le fichier projet on donnera le nom de ce fichier unique comme nom de fichier de pluie, comme nom de fichier d'ETP, comme nom de fichier de débits, etc.
  0 = Présentation par défaut des données dans les fichiers de type Excel_Date.
  Il n'y a qu'une seule colonne de données par fichier et il y a un fichier par type de donnée.
  P = Les données de pluies seront lues dans la colonne n°P.

  Attention : P ne signifie pas le caractère « P » mais un numéro de colonne pour les Pluies. Il en est de même pour les paramètres suivants : E, D, N, T, S, Q désignent des numéros de colonnes contenant les ETP, Débits, Niveaux, Températures, précipitations Neigeuses et Pompages.

- **Numéro de la 'colonne' des ETP : Déf = 0 = Identique à celle de la pluie**
  0 = Les données d'ETP seront lues dans la même colonne que celle de la pluie, c'est-à-dire généralement dans la colonne n°1.
  E = Les données d'ETP seront lues dans la colonne n°E.

- **Numéro de la 'colonne' des Débits de rivière : Déf = 0 = Identique à la pluie**
  0 = Les données de débits de rivière seront lues dans la même colonne que celle de la pluie, c'est-à-dire généralement dans la colonne n°1.
  D = Les données de débits seront lues dans la colonne n°D.

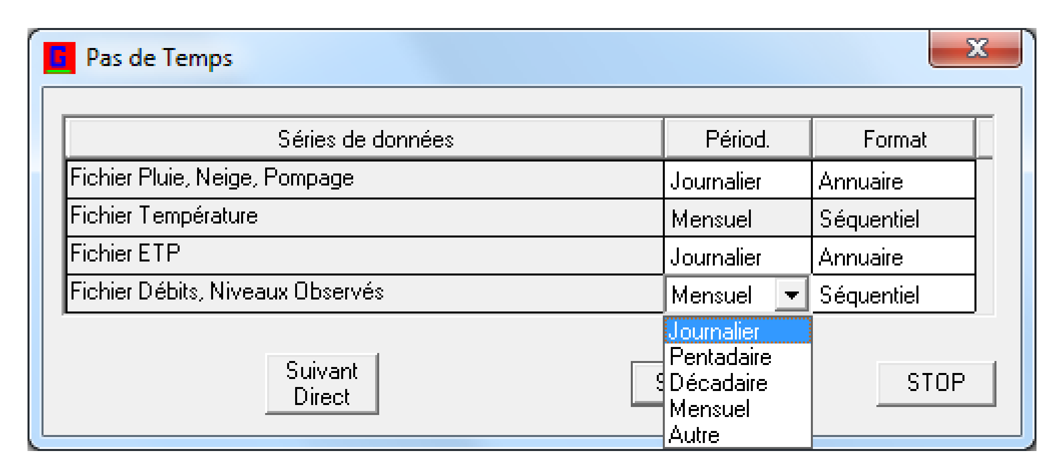
- **Numéro de la 'colonne' des Niveaux de nappe : Déf = 0 = Identique à la pluie**
  0 = Les données de niveaux seront lues dans la même colonne que celle de la pluie, c'est-à-dire généralement dans la colonne n°1.
  N = Les données de niveaux de nappe seront lues dans la colonne n°N.

- **Numéro de la 'colonne' des Températures : Déf = 0 = Identique à la pluie**
  0 = Les données de températures seront lues dans la même colonne que celle de la pluie, c'est-à-dire généralement dans la colonne n°1.
  T = Les données de températures seront lues dans la colonne n°T.

- **Numéro de la 'colonne' de la Neige : Déf = 0 = Identique à celle de la pluie**
  0 = Les données de neige seront lues dans la même colonne que celle de la pluie, c'est-à-dire généralement dans la colonne n°1.
  S = Les données de neige seront lues dans la colonne n°S.

- **<u>Numéro de la 'colonne' des Pompages : Déf = 0 = Identique à celle de la pluie</u>**
  0 = Les données de pompages seront lues dans la même colonne que celle de la pluie, c'est-à-dire généralement dans la colonne n°1.
  Q = Les données de pompages seront lues dans la colonne n°Q.

3.3.7. Pas de temps et formats des données (Figure 22)



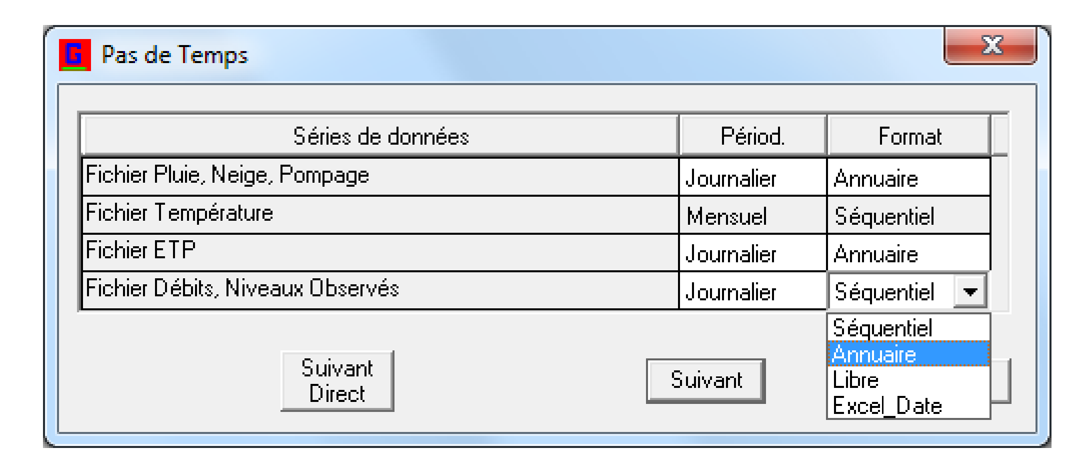


Figure 22 - Définition des durées des pas de temps et des formats de fichiers associés.

Chaque groupe de séries temporelles peut avoir un pas de temps différent et un format différent.
Les groupes de séries temporelles sont les suivants :

- Pluie, Neige, Débit de Pompage.
- Température de l'air.
- Évapotranspiration potentielle (ETP).
- Débits de rivière et / ou Niveaux de nappe.

Le pas de temps et le format de chacun de ces groupes sont décrits par 2 paramètres :

Pas de temps possibles :

- 0 = Pas de temps journalier.
- 1 = Pas de temps pentadaire : 72 pas de temps d'environ 5 jours par an.
- 2 = Pas de temps décadaire : 36 pas de temps d'environ 10 jours par an.
  Les deux premières décades du mois ont une durée de 10 jours, la dernière s'étend du 21 du mois jusqu'à la fin du mois.
- 3 = Pas de temps mensuel : 12 pas de temps par an.
- 4 = Pas de temps autre, « non standard ».

Chaque groupe de données peut avoir un pas de temps différent, cependant le pas de temps de la pluie doit être le plus fin. Par exemple il est possible de calculer des débits moyens mensuels à partir de pluies journalières et d'ETP décadaires mais, sauf exception choisie par une option, il n'est pas possible de calculer des débits de rivière ou des niveaux de nappe journaliers à partir de pluies décadaires.
Il convient de remarquer que les seuls pas de temps uniformes sont le pas de temps journalier et les pas de temps « non standards ». Les pas de temps décadaires ont des durées qui varient de 8 à 11 jours, et les pas de temps mensuels des durées qui varient de 28 à 31 jours, ce qui introduit une certaine approximation.

Formats possibles pour les données :

- 0 = Format « Gardénia Séquentiel » (sauf pour le pas de temps journalier).
  Les données apparaissent dans l'ordre chronologique.
- 1 = Format « Gardénia Annuaire » :
  Les données apparaissent comme dans un annuaire, avec 12 colonnes, une colonne par mois.
  Pour le pas de temps mensuel : le format séquentiel et le format annuaire sont identiques.
- 2 = Format libre :
  Les données apparaissent dans l'ordre chronologique sans format particulier.
- 3 = Format « Excel_Date ».
  > Les données sont sous forme de couples 'date valeur', une date par ligne.
  > La date est sous la forme jj/mm/aaaa ou bien sous la forme jj/mm/aaaa hh:mm
  > Un tel fichier peut être exporté directement, en fichier texte, à partir d'un fichier Excel © ou son équivalent.
  > Ce format, quoique moins compact que les autres, est le plus souple
  > Il convient de noter que : bien que les dates apparaissent en clair, les données doivent être à pas de temps constant. Toutes les données doivent apparaître. Par exemple pour des données journalières, il doit y avoir 365 ou 366 données par an (même s'il n'y a pas de pluie ou s'il y a des lacunes d'observations).
  > Ce format « Excel_Date » est le plus adapté au pas de temps « non standard ».
  > On peut également utiliser un format « Excel_Date » étendu, avec plusieurs colonnes de données. Ces différentes colonnes peuvent correspondre aux données relatives à différents bassins versants, ou bien correspondre à différents types de données hydroclimatiques (données de Pluies, d'ETP, de Débits de rivière etc.).

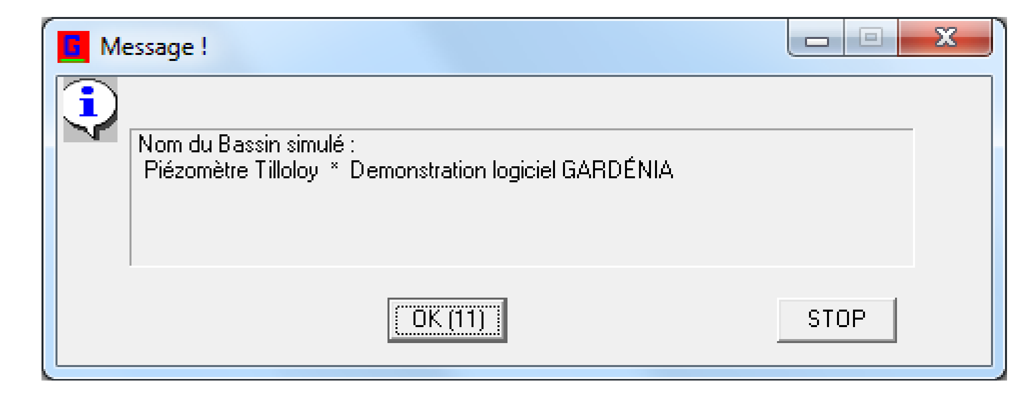
Dans tous les cas, le séparateur décimal doit être un « point décimal », jamais une virgule.

<u>Durée des pas de temps non standards</u> :
Quand le pas de temps n'est pas standard : Par exemple des pas de temps de 1/2 heure ou de 6 minutes : le pas de temps est défini par 2 paramètres :

- L'unité de durée des pas de temps. Les unités possibles sont :
  Seconde, Minute, Heure, Jour, Mois, Année.
  (1 mois = 365.25 / 12 jours ; 1 année = 365.25 jours)

- La durée du pas de temps dans l'unité choisie.

Quand on utilise une durée non standard pour un groupe de séries temporelles, la même durée de pas de temps doit être utilisée pour tous les groupes de séries temporelles.



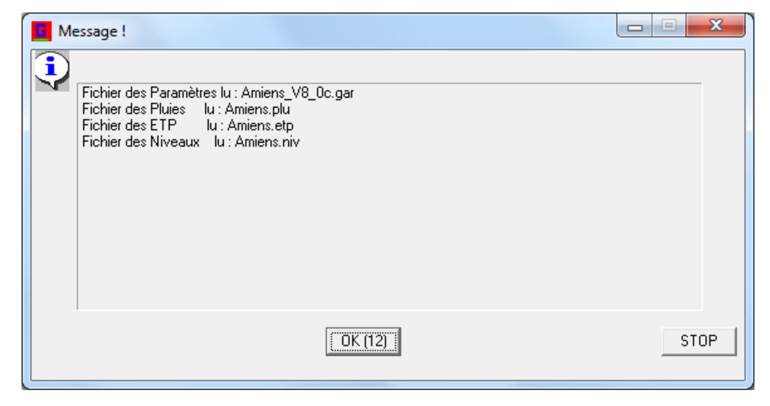


Figure 23 - Début des calculs et contrôle des fichiers lus.

3.3.8. Paramètres généraux (Figure 24 et Figure 25)

Plage des observations prises en compte

Ce sont les valeurs extrêmes des données d'observations (débits et niveaux) qui seront prises en compte à la fois pour la calibration automatique et pour le calcul des statistiques. Les observations extérieures à cet intervalle seront ignorées.

- **<u>Valeur maximale des débits de rivière observés pris en compte</u>**
  Valeur maximale de débit prise en compte pour la calibration automatique.

- **Valeur minimale des débits de rivière observés pris en compte**
  Valeur minimale de débit prise en compte pour la calibration automatique.

Par défaut : Si la valeur minimale et la valeur maximale donnée pour les débits de rivière sont toutes les deux égales à 0, toutes les valeurs seront prises en compte : c'est le cas général.

- **Valeur maximale des niveaux de nappe observés pris en compte**
  Valeur maximale de niveau prise en compte pour la calibration automatique.

- **Valeur minimale des niveaux de nappe observés pris en compte**
  Valeur minimale de niveau prise en compte pour la calibration automatique.

Par défaut : Si la valeur minimale et la valeur maximale donnée pour les niveaux de nappe sont toutes les deux égales à 0, toutes les valeurs seront prises en compte : c'est le cas général.

- **Valeur minimale possible pour les débits de rivière simulés**
  Valeur minimale possible pour les débits simulés.

Par défaut cette valeur est égale à 0. Dans les schémas avec influence d'un pompage, il peut parfois être utile d'introduire une valeur supérieure à zéro pour éviter de simuler des débits anormalement faibles.

Paramètres de prévision

- **Coefficient de réajustement des réservoirs (pour la prévision)**

C'est le coefficient de réajustement des niveaux des réservoirs utilisé pour corriger les écarts avant de réaliser des prévisions. Ce coefficient est calculé automatiquement lors de la phase de préparation de la prévision, mais exceptionnellement il est possible de le modifier.
C'est un nombre compris entre 0 (pas de réajustement) et 1 (réajustement total).

- **Écart-type des niveaux du réservoir intermédiaire (pour la prévision)**

C'est l'écart-type des niveaux du réservoir intermédiaire. Il est utilisé en prévision, pour la répartition des corrections de niveaux entre les différents réservoirs du modèle. Cet écart-type est calculé automatiquement lors de la phase de préparation de la prévision.

- **Écart-type des niveaux du réservoir souterrain (pour la prévision)**

C'est l'écart-type des niveaux du réservoir souterrain. Il est utilisé en prévision, pour la répartition des corrections de niveaux entre les différents réservoirs du modèle. Cet écart-type est calculé automatiquement lors de la phase de préparation de la prévision.

- **Écart-type des niveaux du réservoir souterrain n°2 (pour la prévision)**

C'est l'écart-type des niveaux du réservoir souterrain n°2 (réservoir souterrain lent). Il est utilisé en prévision, pour la répartition des corrections de niveaux entre les différents réservoirs du modèle. Cet écart-type est calculé automatiquement lors de la phase de préparation de la prévision.

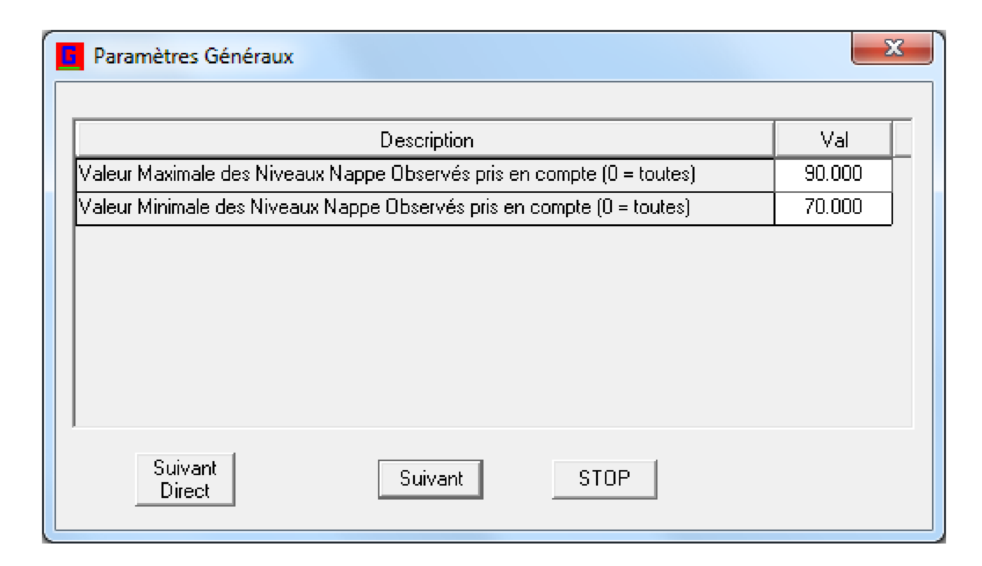


Figure 24 - Définition de la plage des observations à prendre en compte.

Options du bassin

Ces options, définies par des nombres entiers, sont relatives au bassin courant.

- **Nombre d'années des séries de données (Pluie, ETP, Températures, Observations, Pompages)**
  C'est le nombre d'années dans les séries de données climatiques et les séries temporelles de données d'observations. Ce nombre d'années doit être le même pour toutes les séries : pluie, évapotranspiration potentielle (ETP), température de l'air, débit de rivière observé, niveau de nappe observé, pompages.

  Remarque : Quand on utilise un pas de temps non standard, par exemple un pas de temps de 1 heure ou de 10 minutes, la notion d'« années » ne s'applique pas. Une « année » désigne alors arbitrairement une suite de 12 pas de temps (par analogie à 12 mois par an). On considérera ainsi qu'une série horaire de 1824 heures (152 x 12) comprend 152 années.

  Cas particulier : Si on laisse le nombre d'années est égal à 0, toutes les années des fichiers seront prises en compte automatiquement. Cette option est utilisable uniquement si on simule un seul bassin à la fois. Dans le cas, où les différentes séries n'auraient pas la même longueur (ce qui est déconseillé), c'est la longueur de la série de pluies qui est utilisée.

- **Nombre d'années de démarrage**
  C'est le nombre d'années d'observations nécessaires à la mise en régime du modèle.

  Le débit de rivière et le niveau de nappe du premier pas de temps dépendent des données climatiques de plusieurs pas de temps précédents.
  Le premier pas de temps de débit de rivière et de niveau de nappe ne peut donc pas être simulé correctement à partir du premier pas de temps de pluie, d'ETP et de température. On considère donc que les débits et les niveaux sont calculés correctement à partir d'un certain nombre d'années dites « années de démarrage ».

Les valeurs calculées pendant ces années de démarrage ne sont pas prises en compte pour la comparaison avec les observations de débits et / ou de niveaux observés. Les séries de données climatiques et de données observées (débit et / ou niveau) ayant le même nombre d'années, les premières années d'observations sont donc inutilisées.
Pour éviter cet inconvénient, il est conseillé d'acquérir les données climatiques (pluies, ETP, températures, pompages) d'une ou plusieurs années précédant la première année d'observations de débits et / ou de niveaux. On créera alors la ou les années correspondantes de débits et / ou de niveaux observés au moyen de valeurs fictives qui ne seront pas prises en compte dans les calculs, mais serviront seulement à occuper une place dans les fichiers de données.
Les valeurs fictives, qui sont aussi celles utilisées pour les lacunes d'observations, sont :

- -2 : pour les débits de rivière.
- 9999 : pour les niveaux de nappe.

- **<u>Nombre de cycles de démarrage</u>**

Pour rallonger la période de démarrage, quand on ne dispose pas de suffisamment de données climatiques avant le début des observations, on peut réaliser plusieurs cycles d'initialisation.
Par exemple si on a défini 2 années de démarrage et qu'on réalise 3 cycles de démarrage : il y aura 3 cycles répétant les 2 années de démarrage, soit 6 années de démarrage au total.
Par défaut (si on laisse la valeur à 0) : Il y a 1 cycle de démarrage.

- **<u>Nombre d'années finales à ignorer pour la calibration</u>**

C'est le nombre d'années finales qui ne sont pas prises en compte pour la calibration automatique des paramètres. Par défaut toutes les années de données sont prises en compte après la période de démarrage. Cependant, dans certains cas, on peut choisir de caler les paramètres uniquement sur une certaine période, en ignorant les années ultérieures du fichier. Ce paramètre est particulièrement utile quand on simule successivement plusieurs bassins puisque les données sont écrites bassin après bassin dans les fichiers.
Si on donne une valeur négative à ce paramètre, par exemple -2014, il désigne alors le numéro de la dernière année utilisée pour la calibration (2014 dans notre exemple).
Ce paramètre est accessible uniquement avec le profil d'utilisation avancée.

- **<u>Date de la première année des données</u>**

C'est le numéro de la première année des fichiers de données d'observations et des fichiers de données climatiques : par exemple 2016 si la première année est l'année 2016.

- **<u>État initial des réservoirs du modèle</u>**

C'est une option qui permet de choisir quels seront les niveaux des réservoirs du modèle en début de calcul.
0 : Le modèle se mettra en équilibre par rapport à une pluie efficace annuelle.
La valeur de la pluie efficace sera précisée dans la boite de dialogue des « paramètres physiques ».
-1 : Départ avec le réservoir hypodermique H et les réservoirs souterrains tous vides.
-2 : Départ avec tous les réservoirs vides, y compris les réservoirs sol « réserve utile » et réservoir sol progressif).
Par défaut le réservoir sol « réserve utile » est saturé en début de calcul, car le début de l'année civile, dans l'hémisphère nord, est au milieu de l'hiver, la saison la plus pluvieuse.
Si on utilise des années hydrologiques, le début des calculs se produit à la fin de la saison la plus sèche : il est plus approprié de démarrer les calculs avec des réservoirs sol vides.

- **Nombre maximal d'itérations pour la calibration**

C'est le nombre maximal de simulations qui seront réalisées pour la calibration automatique des paramètres hydrologiques.
Si on choisit 0 itération, il n'y aura pas de calibration automatique.

- **Numéro du jour initial (si le pas de temps est non standard)**

C'est le numéro du jour, de 1 à 31, du début de la simulation quand le pas de temps est un pas de temps « non standard ». Par exemple si le début de la simulation est le 24 Mars, le numéro à donner est 24. Par défaut, si on laisse ce numéro à 0, le jour de début est le jour n°1.
Si le pas de temps est un pas de temps standard, journalier, pentadaire, décadaire ou mensuel, ce numéro n'est pas utilisé.

- **Numéro du mois initial (si le pas de temps est non standard)**

C'est le numéro du mois du début de la simulation quand le pas de temps est un pas de temps « non standard ». Par exemple si le début de la simulation est au mois de Mars, le numéro à donner est 3. Par défaut, si on laisse ce numéro à 0, le mois de début est Janvier.
Si le pas de temps est un pas de temps standard, journalier, pentadaire, décadaire ou mensuel, ce numéro n'est pas utilisé.

- **Heure initiale (si le pas de temps est non standard)**

C'est le numéro de l'heure du début de la simulation quand le pas de temps est un pas de temps « non standard ». Par exemple si le début de la simulation se produit à 15h37, la valeur à donner est 15.
Si le pas de temps est un pas de temps standard, journalier, pentadaire, décadaire ou mensuel, ce numéro n'est pas utilisé.

- **Minute initiale (si le pas de temps est non standard)**

C'est la minute de l'heure du début de la simulation quand le pas de temps est un pas de temps « non standard ». Par exemple si le début de la simulation se produit à 15h37, la valeur à donner est 37.
Si le pas de temps est un pas de temps standard, journalier, pentadaire, décadaire ou mensuel, ce numéro n'est pas utilisé.

Options du bassin pour une utilisation avancée

- **Décalage de la série des pluies**

C'est un nombre entier qui peut permettre de décaler d'un certain nombre de pas de temps la série des pluies. Si le décalage est positif, par exemple +5, la série des pluies est retardée puisque la pluie du pas de temps n°k est affectée au pas de temps n°k+5, donc 5 pas de temps plus tard. Si le nombre est négatif, par exemple -2, la série des pluies est avancée.
Ce paramètre peu utilisé est accessible uniquement avec le profil d'utilisation avancée.

- **Décalage de la série des débits de rivière et / ou de niveaux de nappe observés**

C'est un nombre entier qui peut permettre de décaler d'un certain nombre de pas de temps la série des débits et / ou des niveaux observés. Si le décalage est positif, par exemple +5, la série des débits est retardée puisque le débit du pas de temps n°k est affectée au pas de temps n°k+5, donc 5 pas de temps plus tard. Si le nombre est négatif, par exemple -2, la série des débits est avancée.

Ce paramètre peu utilisé est accessible uniquement avec le profil d'utilisation avancée.

- **Durée des pluies en moyenne par pas de temps (utilisation avancée)**

Paramètre obsolète.
C'est un nombre entier qui peut servir à définir le rapport de la durée effective de la pluie sur la durée du pas de temps. Si on utilise un grand pas de temps, par exemple un pas de temps mensuel, peu adapté à un régime de pluies éparses, on peut obtenir de meilleurs résultats en fixant un tel rapport. Par exemple avec un pas de temps mensuel, si on a en moyenne 6 jours de pluies par mois, soit 20 % du pas de temps, on donnera une durée moyenne de 20 %. Le modèle considérera alors que les pluies surviennent pendant les premiers 20 % du pas de temps et qu'il n'y a pas de pluies pendant les 80 % restant du pas de temps.
Pour fixer une durée de 20 % il faut donner la valeur 20
Dans un tel cas, il est cependant plutôt conseillé d'utiliser un pas de temps plus fin.
Ce paramètre est accessible uniquement avec le profil d'utilisation avancée.
Par défaut, si on laisse ce paramètre à 0, la pluie survient pendant 100 % du pas de temps.

- **Nombre de réservoirs souterrains**

C'est un nombre qui définit le schéma utilisé pour l'écoulement souterrain :

1 : Un seul réservoir souterrain.
2 : Deux réservoirs souterrains, donc deux composantes souterraines.
3 : Un réservoir souterrain double avec une composante souterraine lente et une deuxième composante souterraine rapide qui apparaît uniquement quand le niveau dans ce réservoir dépasse un seuil, c'est-à-dire quand le niveau de la nappe est haut.

Un tel schéma, avec un réservoir double, est utile en particulier pour représenter un niveau de nappe avec un effet de débordement. Dans un tel cas on observe que le niveau de la nappe n'augmente plus ou quasiment plus à partir d'un certain niveau. Ce schéma peut aussi permettre de prendre en compte l'effet de fractures ou bien une augmentation de la perméabilité près de la surface.

Il est conseillé de ne conserver qu’un seul réservoir souterrain à chaque fois que c'est possible pour privilégier la stabilité de la calibration.
Par défaut, si on laisse le nombre de réservoirs égal à 0, c'est un schéma avec un seul réservoir souterrain qui sera utilisé.

- **Numéro du réservoir souterrain <=> Niveau de nappe (s'il y a 2 réservoirs souterrains)**

Quand le schéma fait intervenir deux réservoirs souterrains, les niveaux de nappe observés (et calculés) peuvent correspondre au choix :
<> Au réservoir souterrain n°1 : nappe superficielle (composante souterraine rapide)
<> Au réservoir souterrain n°2 : nappe profonde (composante souterraine lente)
On donnera donc selon le cas le numéro 1 ou le numéro 2.
Par défaut, si on laisse ce numéro égal à 0, c'est le réservoir souterrain n°1 qui sera utilisé.
Si on utilise un schéma avec un seul réservoir souterrain (cas général), cette option est sans objet.

Options de prévision

Ces options sont disponibles uniquement avec le profil d'utilisation avancée et si on a choisi une opération de prévision.

- **Nombre d'années de données du fichier de pluies etc. pour la prévision**

C'est un nombre d'années de données du fichier des données climatiques (pluie, ETP, Température) pour l'émission de prévisions.

> Remarque : Quand on utilise un pas de temps non standard, par exemple un pas de temps de 1 heure ou de 10 minutes, la notion d'« années » ne s'applique pas. Une « année » désigne alors arbitrairement une suite de 12 pas de temps (par analogie à 12 mois par an). On considérera ainsi qu'une série horaire de 1824 heures (152 x 12) comprend 152 années.

- **Jour d'émission de la prévision (1-31)**

C'est le numéro du jour, de 1 à 31, de l'émission de la prévision si le pas de temps est journalier.
Par exemple si la date d'émission de la prévision est le 15 Mai, le numéro à donner est 15.
Par défaut, si on laisse ce numéro à 0, le jour sera fixé au jour n°1.
Si le pas de temps n'est pas journalier : fixer ce nombre à 0.
La prévision est émise à la date (Jour, Mois) de la dernière année d'observations.

- **Numéro du mois [si journalier ou mensuel] (ou du pas de temps) d'émission de la prévision)**

C'est le numéro du mois d'émission de la prévision quand le pas de temps est journalier ou mensuel. Par exemple, si l'émission est au mois de Mai, le numéro à donner est 5.
Par défaut, si on laisse ce numéro à 0, le mois de début est Janvier.
Si le pas de temps n'est ni journalier ni mensuel, par exemple un pas de temps pentadaire ou décadaire, ce numéro désigne le numéro du pas dans l'année.
La prévision est émise à la date (Jour, Mois) de la dernière année d'observations.

- **Portée de la prévision (nombre de pas de temps de la prévision)**

C'est la durée de la prévision exprimée en nombre de pas de temps.
Par exemple, avec un pas de temps journalier, si on émet une prévision pour les 30 jours suivants, le nombre à donner est 30.

- **Date de la première année de prévision des fichiers [si journalier]**

C'est la date de la première année des fichiers de données climatiques de prévision, par exemple 1985.
Ce paramètre, qui sert à déterminer si les années sont bissextiles, est utilisé uniquement si le pas de temps est journalier.
Si le pas de temps n'est pas journalier : fixer cette date à 0.

Position des données du bassin dans les fichiers

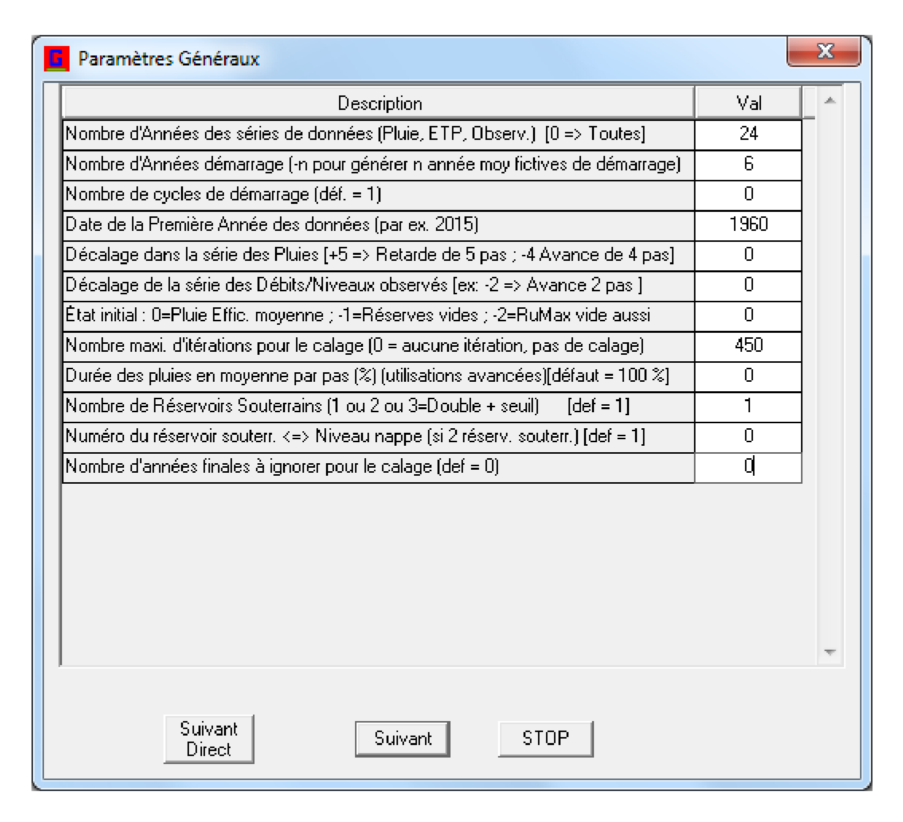
Cette option est disponible uniquement avec le profil d'utilisation avancée.

- **Numéro de la 'colonne' de données des fichiers, correspondant à ce bassin**

Si on a choisi l'option : « Données de tous les sites dans différentes colonnes d'un même fichier » dans les « Options générales » : on donne ici le numéro de la colonne, la même pour chaque fichier de données, (fichier des débits de rivière, des pluies, des ETP, des

températures, des précipitations neigeuses, des pompages) dans laquelle seront lues les données.
La date est toujours placée dans la colonne n°1, et les numéros de colonne s'entendent au-delà de la colonne de la date (la colonne n°1 est la 1ère colonne de données, donc en réalité la 2ème colonne du fichier).

- 0 : Par défaut : colonne numéro 1.
- -1 : La colonne est le numéro d’ordre du bassin (par ex : données du bassin n°5 dans la colonne n°5).
- K : Les données du bassin sont dans la colonne n°K.



Description	Val
Nombre d'Années des séries de données (Pluie, ETP, Observ.) [0 => Toutes]	24
Nombre d'Années démarrage (-n pour générer n année moy fictives de démarrage)	6
Nombre de cycles de démarrage (déf. = 1)	0
Date de la Première Année des données (par ex. 2015)	1960
Décalage dans la série des Pluies [+5 => Retarde de 5 pas ; -4 Avance de 4 pas]	0
Décalage de la série des Débits/Niveaux observés [ex: -2 => Avance 2 pas]	0
État initial : 0=Pluie Effic. moyenne ; -1=Réserves vides ; -2=RuMax vide aussi	0
Nombre maxi. d'itérations pour le calage (0 = aucune itération, pas de calage)	450
Durée des pluies en moyenne par pas (%) (utilisations avancées)[défaut = 100 %]	0
Nombre de Réservoirs Souterrains (1 ou 2 ou 3=Double + seuil) [def = 1]	1
Numéro du réservoir souterr. <=> Niveau nappe (si 2 réserv. souterr.) [def = 1]	0
Nombre d'années finales à ignorer pour le calage (def = 0)	0

Figure 25 - Définition ou modification des paramètres généraux (nombre d'années, nombre d'itérations, nombre de réservoirs, etc.).

3.3.9. Paramètres physiques (Figure 26)

Ce sont les paramètres physiques permettant de calculer les débits de rivière et les niveaux de nappe.

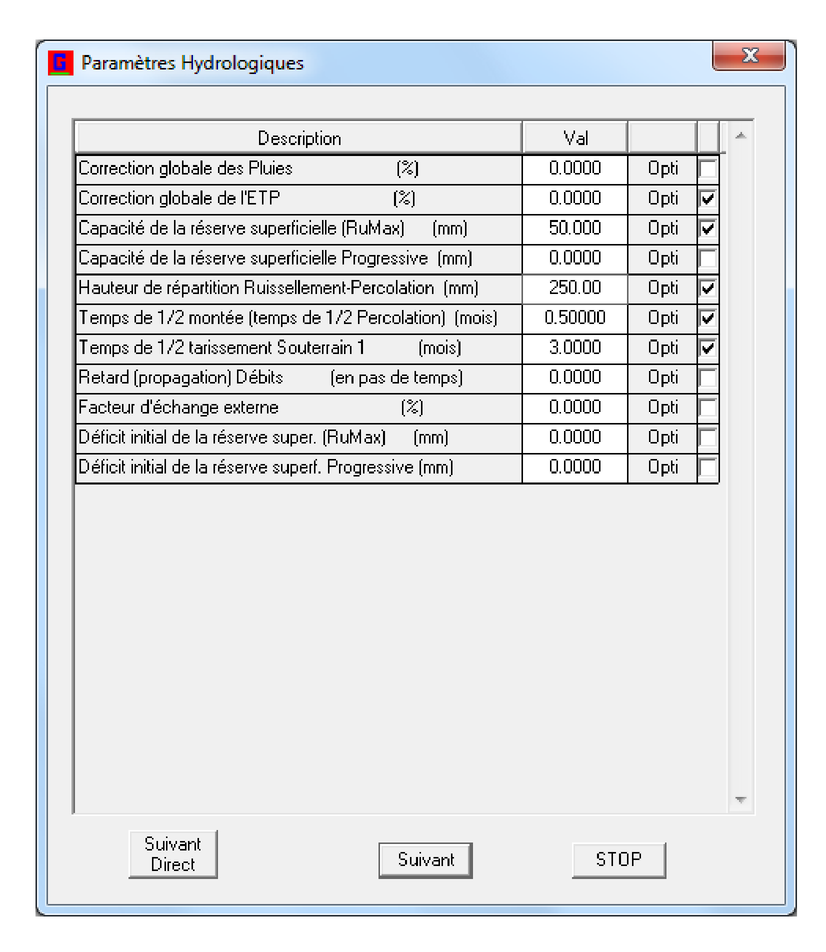


Figure 26 - Définition ou modification des paramètres physiques (capacité ou constantes de demi-tarissement des réservoirs).

Paramètres hydrologiques, hors fonte de neige

- **Pluie Efficace moyenne annuelle pour initialisation**

  Ce paramètre est utilisé uniquement si, dans le paragraphe « Paramètres Généraux du bassin », l'option choisie pour l'« État initial des réservoirs du modèle » est égale à 0, c'est-à-dire initialisation par pluie efficace moyenne annuelle.

  Le modèle se met en équilibre par rapport à cette pluie efficace moyenne annuelle, exprimée en mm/an. Les réservoirs du modèle sont alors dans l'état qui serait obtenu si le système était soumis à cette pluie efficace moyenne pendant une durée infinie.

  Cas particulier : Si la valeur donnée pour cette pluie efficace moyenne est égale à 0 : à chaque itération, le modèle fait un pré-calcul pour déterminer la pluie efficace moyenne résultant des pluies et des ETP de toute la période de simulation et de la capacité de la réserve superficielle. Cette méthode peut créer des instabilités et il est plutôt conseillé de donner une pluie efficace moyenne, éventuellement après un premier calcul de dégrossissage.

  - Unité : mm/an.
  - Valeur de départ conseillée : 100 à 200 mm/an.
  - Optimisation : Ce paramètre n'est pas optimisable.

- **Débit extérieur éventuel**

Ce débit extérieur Qo (en m^3/s) est un débit non contrôlé par la mesure à l'exutoire. Le débit observé Q_{OBS} se déduit du débit calculé Q_{CAL} par la relation :
$Q_{OBS} = Q_{CAL} + Qo + écart_simulation$.

  - Unité : m^3/s.
  - Valeur standard : 0 m^3/s.

  Ce débit extérieur doit être en principe imposé à 0, sauf dans des cas très particuliers : fuite du bassin, exportation ou importation d'eau par un canal, prélèvement, échanges latéraux de bassin à bassin.

  - Optimisation : non conseillée en utilisation classique.

- **Superficie du bassin versant**

C'est la superficie du bassin versant. Cette superficie est généralement la superficie du bassin versant telle qu'elle est déterminée à partir d'une carte topographique, ou publiée dans un annuaire. La valeur de ce paramètre doit alors être imposée à cette valeur mesurée.
Cependant, dans un certain nombre de cas, cette superficie est inconnue ou mal connue, à savoir :
<> Bassin d'alimentation d'une source ;
<> Exutoire ne contrôlant qu'une partie du bassin versant (exutoires multiples) ;
<> Présence de parties endoréiques dans le bassin versant.

  - Unité : km^2.
  - Valeur standard : superficie mesurée.
  - Optimisation : non conseillée.

- **Niveau de base local de la nappe**

Ce niveau de base correspond au niveau de nappe qui serait atteint au bout d'un temps infini en l'absence totale de recharge.
Ce paramètre est utilisé uniquement en cas de calcul de niveaux de nappe.

  - Unité : mètre (niveau absolu).
  - Valeur standard : niveau de base estimé au point de calcul.
  - Optimisation : conseillée en cas de calibration sur une série de niveaux de nappe.

  En cas de calibration du modèle sur une série de niveaux de nappe, il convient le plus souvent de laisser le modèle calculer ce niveau de base.
  Le calcul étant effectué par régression linéaire, la valeur de départ n'a pas d'importance et il n'est pas possible de donner de bornes à ce paramètre.

- **Coefficient d'emmagasinement équivalent de la nappe**

C'est le coefficient d'emmagasinement apparent global de la nappe.
Ce paramètre est utilisé uniquement en cas de calcul de niveaux de nappe.

Dans la plupart des cas, le coefficient d'emmagasinement apparent n'est pas connu précisément, et il devra être calculé par le modèle. Il sera intéressant de comparer ce coefficient à un coefficient d'emmagasinement en nappe libre ou à une valeur de porosité efficace, pour voir si l'ordre de grandeur est à peu près identique.
Il faut cependant garder à l'esprit que si le point d'observation du niveau de nappe est proche d'un cours d'eau (ou d'un lac) qui impose un niveau peu variable, le coefficient d'emmagasinement apparent sera considérablement supérieur au coefficient d'emmagasinement en nappe libre réel de l'aquifère.
Il faut également veiller à ce que le coefficient d'emmagasinement apparent calculé ne soit pas extrêmement faible pour compenser artificiellement le fait que le modèle a évacué la majorité de l'écoulement sous forme d'écoulement rapide (superficiel).

- Unité : sans unité.
- Valeur standard : valeur estimée ... (sans importance si elle est optimisée).
- Optimisation : conseillée en cas de calibration sur une série de niveaux de nappe.

En cas de calibration du modèle sur une série de niveaux de nappe, il convient le plus souvent de laisser le modèle calculer ce coefficient d'emmagasinement équivalent.
Le calcul étant effectué par régression linéaire, la valeur de départ n'a pas d'importance et il n'est pas possible de donner de bornes à ce paramètre.

- **Correction globale des Pluies**

C'est un coefficient de correction de la lame d'eau, chargé de compenser une mauvaise représentativité des données pluviométriques issues des observations faites sur des stations dispersées.
C'est un coefficient de correction exprimé en pourcentage : toutes les pluies de tous les pas de temps sont corrigées globalement d'un même pourcentage.

- Unité : %
- Valeur de départ conseillée : 0 %.
- Optimisation : non conseillée, sauf si les pluies exactes sont mal connues en région montagneuse par exemple.

Exemple : Une valeur égale à 15 signifie +15 %, c'est-à-dire multiplication de toutes les pluies par 1.15.

- **Correction globale de l'ETP**

C'est un coefficient de correction de l'ETP, chargé de compenser une mauvaise représentativité des données d'ETP issues de stations météorologiques éloignées. Ce coefficient intègre également les facteurs culturaux définissant l'évaporation maximale à un stade végétatif donné.
C'est un coefficient de correction exprimé en pourcentage : toutes les ETP de tous les pas de temps sont corrigées globalement d'un même pourcentage.

- Unité : %.
- Valeur de départ conseillée : 0 %.
- Optimisation : conseillée.

- **Capacité de la réserve superficielle « réserve utile »**

C'est la capacité de la réserve superficielle. L'ETP agit dans la limite de cette capacité. Une pluie efficace peut survenir uniquement quand cette « réserve utile » est complètement pleine.

- Unité : mm.
- Valeur de départ conseillée : 70 mm.
- Optimisation : conseillée.

On obtient cependant généralement de meilleurs résultats en utilisant uniquement une réserve superficielle progressive, sans réserve superficielle de type « réserve utile », donc avec :

- Valeur de départ conseillée : 0 mm.
- Optimisation : Non.

- **Capacité de la réserve superficielle progressive**

C'est la capacité de la réserve superficielle progressive. Cette réserve a un comportement plus physique qu'une « réserve utile » en « tout ou rien ».
Dans la réserve progressive l'évaporation réelle et la production de pluie efficace suivent des lois quadratiques, fonction de l'état de remplissage de cette réserve.

On note : Satur = Remplissage / Capacité :

- Si la pluie est supérieure à l'ETP, la pluie efficace est calculée par la relation : Pluie_Efficace = (Pluie - ETP) x $Satur^2$
- Si l'ETP est supérieure à la pluie, l'ETR est calculée par la relation : ETR = (ETP - Pluie) x Satur x (2 - Satur)

- Unité : mm.
- Valeur de départ conseillée : 250 mm.
- Optimisation : conseillée.

On obtient généralement de meilleurs résultats en utilisant uniquement une réserve superficielle progressive, sans faire intervenir de réserve superficielle de type « réserve utile ».

- **Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation**

C'est la hauteur du réservoir H conduisant à une égale répartition entre écoulement rapide (ruissellement) et percolation alimentant l'écoulement lent. Quand le niveau dans le réservoir intermédiaire est égal à n fois cette hauteur, l'écoulement rapide instantané est égal n fois la percolation. Réciproquement, quand le niveau est égal à 1/n fois cette hauteur, la percolation est égale à n fois l'écoulement rapide.

Remarque :
Lors d'une calibration uniquement sur des observations de niveaux de nappe, il faut être assez prudent pour éviter que la majeure partie des précipitations efficaces ne soit évacuée en écoulement rapide (écoulement superficiel), la faible composante lente (composante souterraine) étant compensée par un fort coefficient d'amplitude (faible « coefficient d'emmagasinement apparent »).

- Unité : mm
- Valeur de départ conseillée : 70 mm (difficile à préciser, peut atteindre 500 mm ou davantage).
- Optimisation : conseillée.

- **Temps de 1/2 montée (temps de 1/2 percolation)**

C'est le temps caractérisant la vitesse de réaction entre une pluie efficace et un accroissement de la composante lente du débit.

- Unité : mois.
- Valeurs de départ conseillées :
  - 0.5 mois pour un calcul de débit de rivière réagissant rapidement.
  - 1 à 5 mois pour un calcul de débit de source ou une simulation de niveau d'une nappe libre profonde.
- Optimisation : conseillée.

- **Temps de 1/2 tarissement souterrain n°1 (composante souterraine rapide)**

C'est le temps de demi-tarissement de la composante lente de l'écoulement (débit souterrain rapide). C'est le temps au bout duquel, en l'absence de recharge, le débit de la composante lente est divisé par deux.

- Unité : mois
- Valeurs de départ conseillées :
  - 2 mois pour un calcul de débit classique.
  - 3 à 8 mois pour un calcul de débit de source ou un calcul de niveau de nappe libre étendue.
- Optimisation : conseillée.

- **Retard (temps de propagation) des débits de rivière**

  Ce retard représente le « temps de concentration » du bassin, c'est-à-dire le temps nécessaire pour qu'une impulsion de pluie efficace se propage jusqu'à l'exutoire du bassin.
  Il est exprimé en pas de temps, c'est-à-dire en jours si le pas de temps est journalier, ou en heures si le pas de temps est horaire.
  Ce paramètre est utilisé uniquement en cas de calcul de débit de rivière.
  - Unité : Pas de temps.
  - Valeur de départ conseillée : 0 pas de temps.
  - Optimisation : conseillée en cas de calibration sur des débits de rivière.

- **Facteur d'échange souterrain externe**

  C'est un facteur permettant de calculer des échanges souterrains avec l'extérieur, c'est-à-dire une importation ou une exportation de débits souterrains. Ces échanges peuvent par exemple être un apport provenant d'un aquifère profond.
  Ce paramètre est utilisé uniquement en cas de calcul de débits de rivière.
  - Unité : %.
  - Valeur de départ conseillée : 0 %.
  - Optimisation : éventuellement dans un 2ème temps.

Paramètres physiques pour une utilisation avancée

- **Temps de 1/2 transfert vers la nappe profonde**
  - Si on a choisi dans les « Paramètres Généraux » un schéma à un seul réservoir souterrain (option = 1, cas général) ou bien un schéma avec un réservoir souterrain à deux exutoires séparés par un seuil (option = 3) : ce paramètre n'est pas utilisé.
  - Si on a choisi dans les « Paramètres Généraux » un schéma à deux réservoirs souterrains (option = 2), ce paramètre indique le temps de demi-transfert du réservoir souterrain rapide vers le réservoir souterrain lent.
  - Unité : mois.
  - Valeur de départ conseillée : 1 mois.
  - Optimisation : conseillée (si on a choisi ce schéma).

- **Seuil d'écoulement souterrain n°1 (en cas de réservoir souterrain double)**
  - Si on a choisi dans les « Paramètres Généraux » un schéma avec un seul réservoir souterrain (option = 1) ou bien un schéma avec deux réservoirs souterrains (option = 2), ce paramètre n'est pas utilisé.
  - Si on a choisi dans les « Paramètres Généraux » un schéma avec un réservoir souterrain à deux exutoires séparés par un seuil (option = 3) : ce paramètre indique le seuil de remplissage du réservoir souterrain au-dessus duquel se produit un écoulement souterrain rapide.
  - Unité : mm.
  - Valeur de départ conseillée : 50 mm.
  - Optimisation : conseillée (si on a choisi ce schéma).

  Si on a identifié le niveau de nappe NIV (en mètres) à partir duquel le niveau de la nappe semble se stabiliser, il est possible de calculer le seuil du réservoir SEUIL (en mm) :
  SEUIL = (NIV – Niveau_Base) x Coeff_Emmagasinement x 1000.

- **Temps de 1/2 tarissement souterrain n°2 (composante souterraine lente)**
  - Si on a choisi dans les « Paramètres Généraux » un schéma avec un seul réservoir souterrain (option = 1, cas général), ce paramètre n'est pas utilisé.

- Si on a choisi dans les « Paramètres Généraux » un schéma avec deux réservoirs souterrains (option = 2) ou bien un schéma avec un réservoir souterrain à deux exutoires séparés par un seuil (option = 3) : ce temps de demi-tarissement est le temps nécessaire pour qu'en l'absence d'alimentation du réservoir correspondant, le débit de la composante souterraine lente soit divisé par deux. Ce temps de demi-tarissement devrait être de préférence au moins égal au temps de tarissement de la composante souterraine rapide.
- Unité : mois.
- Valeur de départ conseillée :
  - 3.5 mois pour un calcul de débit classique.
  - 4 à 8 mois pour un calcul de débit de source ou un calcul de niveau de nappe libre étendue.
- Optimisation : conseillée (si on a choisi ce schéma).

- **Déficit initial de la réserve superficielle « réserve utile »**

C'est la valeur initiale du déficit de la réserve superficielle de type « réserve utile ». Le déficit est la différence entre la capacité de la réserve et l'état de remplissage de la réserve. Par exemple, si la capacité de la réserve est de 100 mm et que la réserve contient 80 mm d'eau, le déficit est de 20 mm. Par défaut le déficit est égal à 0, donc la réserve est pleine, ce qui correspond le plus souvent à l'état du début de l'année civile dans l'hémisphère nord.

- Unité : mm.
- Valeur de départ conseillée : 0 mm.
- Optimisation : déconseillée.

- **Déficit initial de la réserve superficielle progressive**

C'est la valeur initiale du déficit de la réserve superficielle progressive. Le déficit est la différence entre la capacité de la réserve et l'état de remplissage de la réserve. Par exemple si la capacité de la réserve est de 300 mm et que la réserve contient 250 mm d'eau, le déficit est de 50 mm. Par défaut le déficit est égal à 0, donc la réserve est pleine, ce qui est raisonnable en début d'année civile dans l'hémisphère nord.

- Unité : mm.
- Valeur de départ conseillée : 0 mm.
- Optimisation : déconseillée.

Paramètres hydrologiques pour la fonte de la neige

- **Correction globale des températures**

La température de l'air moyenne la plus représentative du bassin versant n'étant pas toujours connue exactement à partir des stations météorologiques les plus proches, on peut appliquer une correction constante (un décalage positif ou négatif) pour la corriger globalement.

Cette correction ne devrait pas dépasser plus ou moins 3 degrés, sauf si la station météorologique est vraiment éloignée du bassin.

- Unité : °C.
- Valeur de départ conseillée : 0 °C
- Optimisation : Oui.

- **Taux de rétention de la neige**

C'est le pourcentage de rétention maximale d'eau liquide d'un stock neigeux.

Quand la neige fond ou reçoit de la pluie à sa surface supérieure, une partie de cette eau (liquide) est retenue par capillarité. Cette rétention est proportionnelle à la hauteur de neige

(si on suppose une densité à peu près constante... ce qui n'est qu'une approximation). La rétention dans la neige est donc exprimée en %.

- Unité : %.
- Valeur de départ conseillée : 5 %
- Optimisation : Éventuellement.

- **Facteur d'évaporation de la neige**

  C'est un coefficient caractérisant la sublimation du manteau neigeux dans une atmosphère où l'ETP n'est pas totalement satisfaite par les apports pluviométriques.

  Quand l'évapotranspiration potentielle n'est pas satisfaite par les précipitations, le restant peut être prélevé à la neige par sublimation. Cependant, le taux d'évaporation n'est pas le même pour l'eau dans la réserve du sol ou dans la neige. Ce coefficient est donc un coefficient correcteur. Un coefficient correcteur de 20 par exemple, indique que l'évapotranspiration potentielle, quand elle est appliquée à la neige, doit être augmentée de 20 %.

- Unité : %.
- Valeur de départ conseillée : 0 %.
- Optimisation : Non (pas conseillée pour les premiers passages de calibration).

- **Correction de la fonte de la neige par la pluie**

  C'est un pourcentage de correction de la fonte d'un stock neigeux, par les calories contenues dans une pluie à une température au-dessus de 0°.

  La quantité de neige susceptible de fondre par ce phénomène vaut :

  Pluie x (1 + Correction_en_%) x Température / 80

  (La chaleur latente de fusion de l'eau valant 79 cal/g, arrondie à 80).

  La fonte par la pluie est donc corrigée par un facteur global : Par exemple : 20 signifie une augmentation de 20 %.

  Il convient cependant de remarquer que la fonte par les calories de la pluie est très faible devant la fonte par la température de l'air.

- Unité : %.
- Valeur de départ conseillée : 0 %.
- Optimisation : Non.

- **Seuil de fonte naturelle de la neige**

  C'est le seuil de température au-dessus duquel commence la fonte de la neige.

  Cette température est généralement très proche de 0 °C, mais elle peut être un peu différente pour tenir compte de la différence entre la température de l'air mesurée et la température réelle à l'interface air-neige.

- Unité : °C.
- Valeur de départ conseillée : 0 °C.
- Optimisation : Oui.

- **Constante de fonte par la température (« degré-jour »)**

  C'est le coefficient « degré-jour ».

  C'est la hauteur d'eau équivalente à la quantité de la neige susceptible de fondre quotidiennement (si le stock neigeux est suffisamment fourni) sous l'action d'un excès de température de 1 °C au-dessus du seuil de fonte

  Les valeurs courantes sont de 3 à 5 mm de fonte de neige par degré par jour.

  Fonte = Degré-Jour . (Température - Seuil_Fonte) . Durée

- Unité : mm/°C/jour.
- Valeur de départ conseillée : 4 mm/°C/jour.
- Optimisation : Oui.

- **Fonte de la neige au contact du sol**

  C'est la hauteur d'eau équivalente à la quantité de neige susceptible de fondre quotidiennement (si le stock neigeux est suffisamment fourni) sous l'action des calories dégagées par le sol.
- Unité : 1/10 mm d'eau / jour.
- Valeur de départ conseillée : 5 (1/10 mm/jour).
- Optimisation : Oui.

Paramètres contrôlant l'influence des pompages

- **Coefficient d'influence du pompage sur les débits de rivière**

  Ce coefficient caractérise l'amplitude de l'influence sur le débit de la rivière des débits pompés ou injectés.

  La valeur de ce paramètre dépend de l'unité de débit utilisée dans la série des débits pompés.
- Unité : m^3/s par unité de débit de pompage.
- Valeur de départ conseillée : sans importance si elle est optimisée.
- Optimisation : Oui.

  Le calcul étant effectué par régression linéaire, la valeur de départ n'a pas d'importance et il n'est pas possible de donner de bornes à ce paramètre.

- **Temps de ½ réaction du débit de la rivière au pompage**

  C'est le temps qui caractérise la vitesse de réaction du débit de la rivière à une variation de débit de pompage.
- Unité : mois.
- Valeur de départ conseillée : 0.2 mois.
- Optimisation : Oui.

- **Temps de ½ stabilisation de l'influence du pompage sur le débit de la rivière**

  C'est le temps qui caractérise la vitesse de stabilisation de l'influence d'un échelon de variation de débit de pompage sur le débit de la rivière.
- Unité : mois.
- Valeur de départ conseillée : 1 mois.
- Optimisation : Oui.

- **Coefficient d'influence du pompage sur les niveaux de nappe**

  Ce coefficient caractérise l'amplitude de l'influence sur le niveau de la nappe des débits pompés ou injectés.

  La valeur de ce paramètre dépend de l'unité de débit utilisée dans la série des débits.
- Unité : m par unité de débit de pompage.
- Valeur de départ conseillée : sans importance si elle est optimisée.
- Optimisation : Oui.

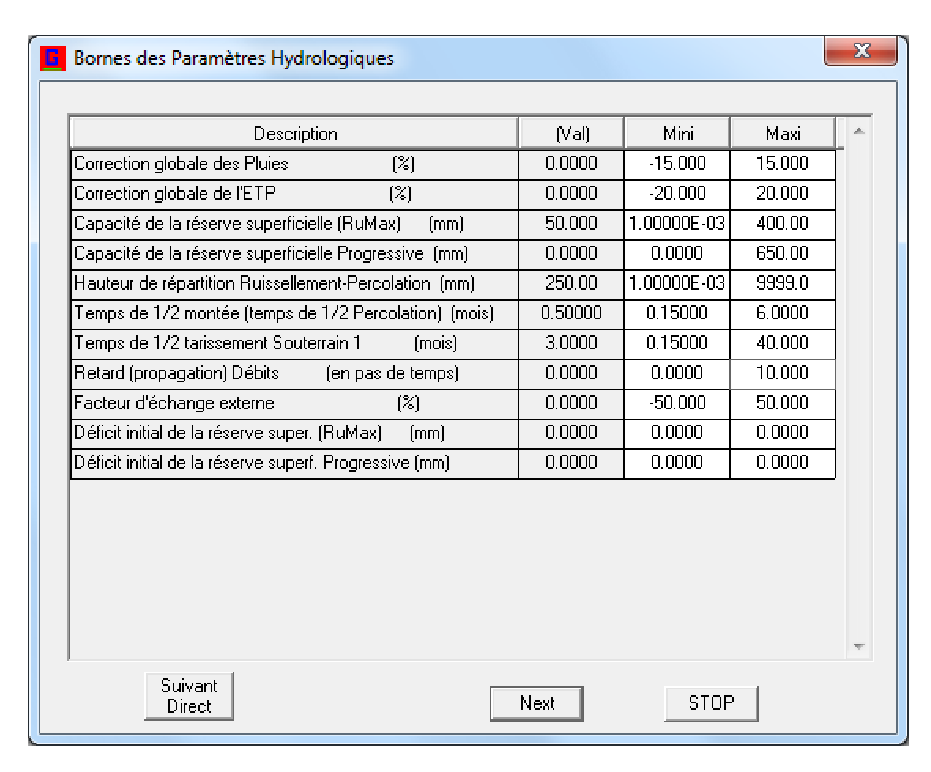
  Le calcul étant effectué par régression linéaire, la valeur de départ n'a pas d'importance et il n'est pas possible de donner de bornes à ce paramètre.

- **<u>Temps de ½ réaction du niveau de la nappe au pompage</u>**
  C'est le temps qui caractérise la vitesse de réaction du niveau de la nappe à une variation de débit de pompage.
  - Unité : mois.
  - Valeur de départ conseillée : 0.2 mois.
  - Optimisation : Oui.

- **<u>Temps de ½ stabilisation de l'influence du pompage sur le niveau de la nappe</u>**
  C'est le temps qui caractérise la vitesse de stabilisation de l'influence d'un échelon de variation de débit de pompage sur le niveau de la nappe.
  - Unité : mois.
  - Valeur de départ conseillée : 1 mois.
  - Optimisation : Oui.

3.3.10. Bornes des paramètres

Ce sont les valeurs minimales et maximales admises pour les paramètres hydrologiques dans le cas où ces paramètres sont à optimiser. Les bornes sont définies par une boite de dialogue (Figure 27)



Description	(Val)	Mini	Maxi
Correction globale des Pluies (%)	0.0000	-15.000	15.000
Correction globale de l'ETP (%)	0.0000	-20.000	20.000
Capacité de la réserve superficielle (RuMax) (mm)	50.000	1.00000E-03	400.00
Capacité de la réserve superficielle Progressive (mm)	0.0000	0.0000	650.00
Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation (mm)	250.00	1.00000E-03	9999.0
Temps de 1/2 montée (temps de 1/2 Percolation) (mois)	0.50000	0.15000	6.0000
Temps de 1/2 tarissement Souterrain 1 (mois)	3.0000	0.15000	40.000
Retard (propagation) Débits (en pas de temps)	0.0000	0.0000	10.000
Facteur d'échange externe (%)	0.0000	-50.000	50.000
Déficit initial de la réserve super. (RuMax) (mm)	0.0000	0.0000	0.0000
Déficit initial de la réserve superf. Progressive (mm)	0.0000	0.0000	0.0000

Figure 27 - Définition ou modification des bornes des paramètres physiques.

3.3.11. Suivi des calculs

Après l'introduction ou le contrôle des options et paramètres, GARDÉNIA lit les fichiers de données hydroclimatiques. Le calcul commence alors, avec l'affichage des itérations et du meilleur coefficient d'ajustement obtenu, au fur et à mesure des améliorations (Figure 28).

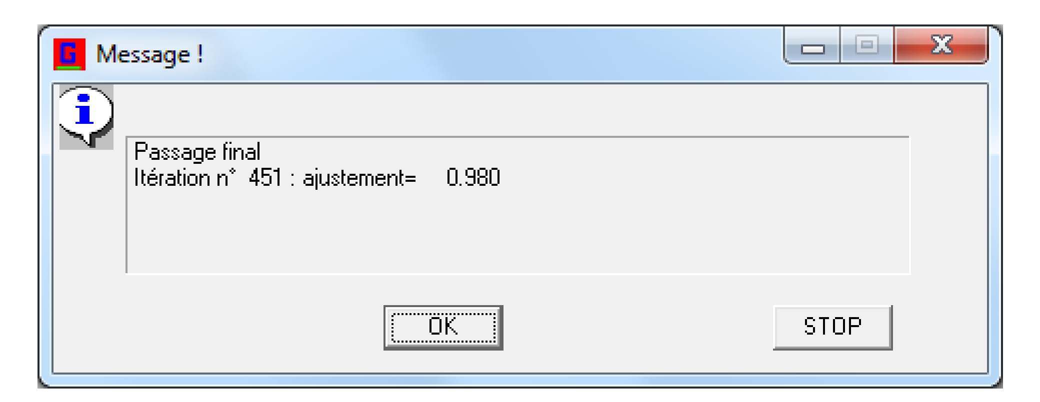


Figure 28 - Affichage des itérations de calcul et du coefficient d'ajustement final.

3.3.12. Affichage graphique à l'écran

À l'issue des calculs, si on a choisi cette option, GARDÉNIA dessine la comparaison des débits de rivière observés et observés puis la comparaison des niveaux de nappe observés et simulés. Il est possible de copier ces dessins dans le presse-papier, par le bouton « Copy Graph », pour les insérer dans un document (Word ou PowerPoint par exemple). Il est possible également de sauvegarder les dessins dans un fichier graphique au format [.bmp], au format [.pcx], etc. (Figure 29).

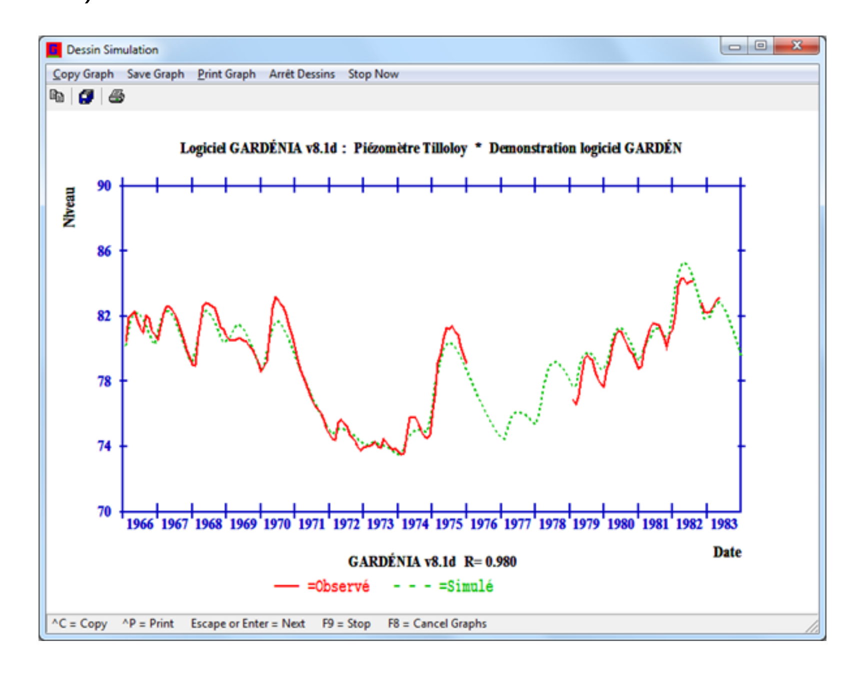


Figure 29 - Graphique de la série observée (rouge) et de la série simulée (vert).

3.3.13. Édition sur fichiers des résultats

À la fin des calculs les noms des différents fichiers créés lors de l'exécution de GARDÉNIA sont affichés à l'écran.

Les fichiers créés ont des noms standards (Figure 30), ils sont donc « écrasés » à chaque exécution de GARDÉNIA dans le même dossier. Pour conserver ces fichiers, il est nécessaire de les renommer avant de relancer l'exécution de GARDÉNIA.

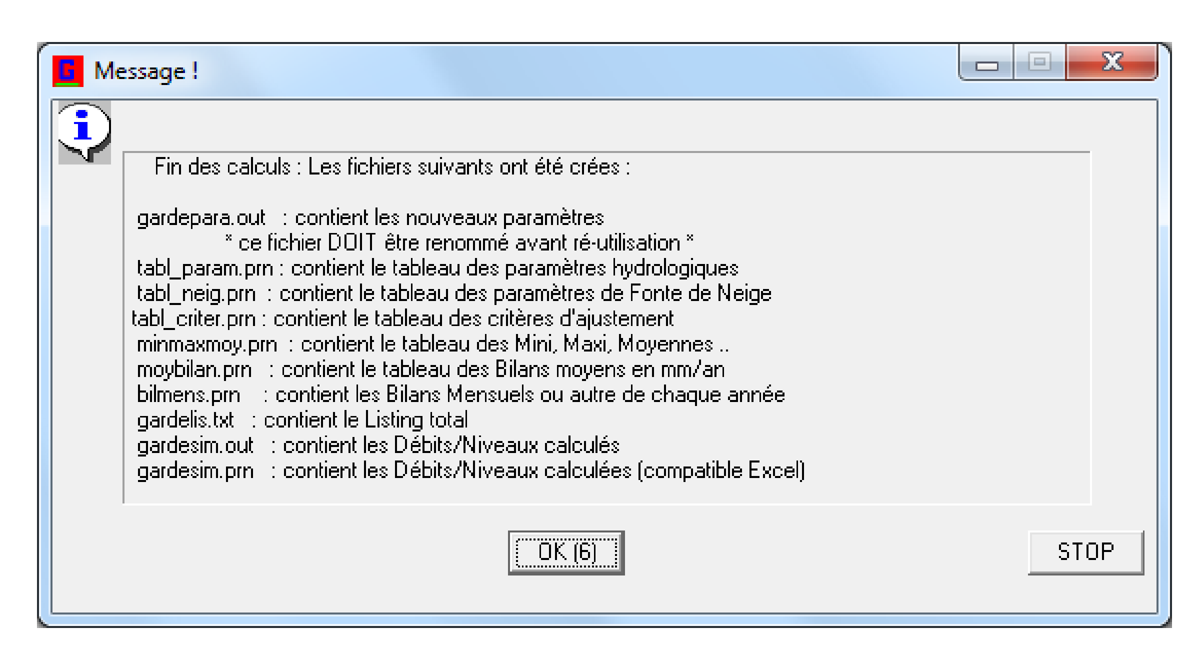


Figure 30 - Fin des calculs : rappel des noms des fichiers de résultats générés.

3.4. LES RÉSULTATS PRODUITS PAR LE MODÈLE

Le modèle GARDÉNIA calcule une série de débits et / ou de niveaux piézométriques, à partir de données climatiques et d'un jeu de paramètres.

Après les calculs, on obtient les résultats suivants dans des fichiers textes :

- Critères d'ajustement entre les débits et / ou niveaux calculés et les débits et / ou niveaux observés, s'ils existent, détails des calculs : fichier « gardelis.txt » ;
- Bilan mensuel ou annuel de toutes les années avec pluie, ETP, ETR, écoulement rapide, écoulements lent et très lent, état des principaux réservoirs, etc. (édition sur option uniquement) : fichier « bilmens.prn » qui peut être lu et dessiné par Excel © ;
- Visualisation sur écran des séries de débits et / ou niveaux simulés, avec éventuellement décomposition du débit en composantes rapide et composante lente ;
- Édition sur fichier de la « pluie efficace » et de la « recharge calculée » : fichier « garde_rech_peff ».

  La « pluie efficace » comprend le ruissellement et l'infiltration ; la « recharge » est la composante alimentant le réservoir souterrain. La série de « recharge calculée » peut être utilisée comme entrée pour un modèle hydrodynamique de nappe par exemple ;
- Édition sur fichier des débits et / ou niveaux piézométriques calculés : fichier « gardesim.prn » (et fichier « gardesim.out »);
- Édition sur fichier des valeurs finales des paramètres du modèle pour un complément de calibration ou pour une extension de données : fichier « gardepara.out » ;
- Édition sur fichier séparé d'un tableau récapitulatif des paramètres hydrologiques de tous les bassins étudiés simultanément : fichier « tabl_param.prn » ; (également en cas de prise en compte de la fonte de la neige : le fichier « tabl_neig.prn » contient les paramètres de fonte de la neige) ;

Les fichiers suivants permettent une étude comparative dans une région :

- Édition sur fichier séparé d'un tableau récapitulatif des critères de calibration (coefficients de Nash, coefficients de corrélation, biais) : fichier « tabl_criter.prn ».
- Édition sur fichier séparé des valeurs minimales, maximales et moyennes simulées et calculées : « minmaxmoy.prn » ;
- Édition sur fichier séparé des bilans annuels moyens : « moybilan.prn ».
- Édition sur fichier séparé des réponses impulsionnelles : « reponse_impuls.prn ». (Figure 31).

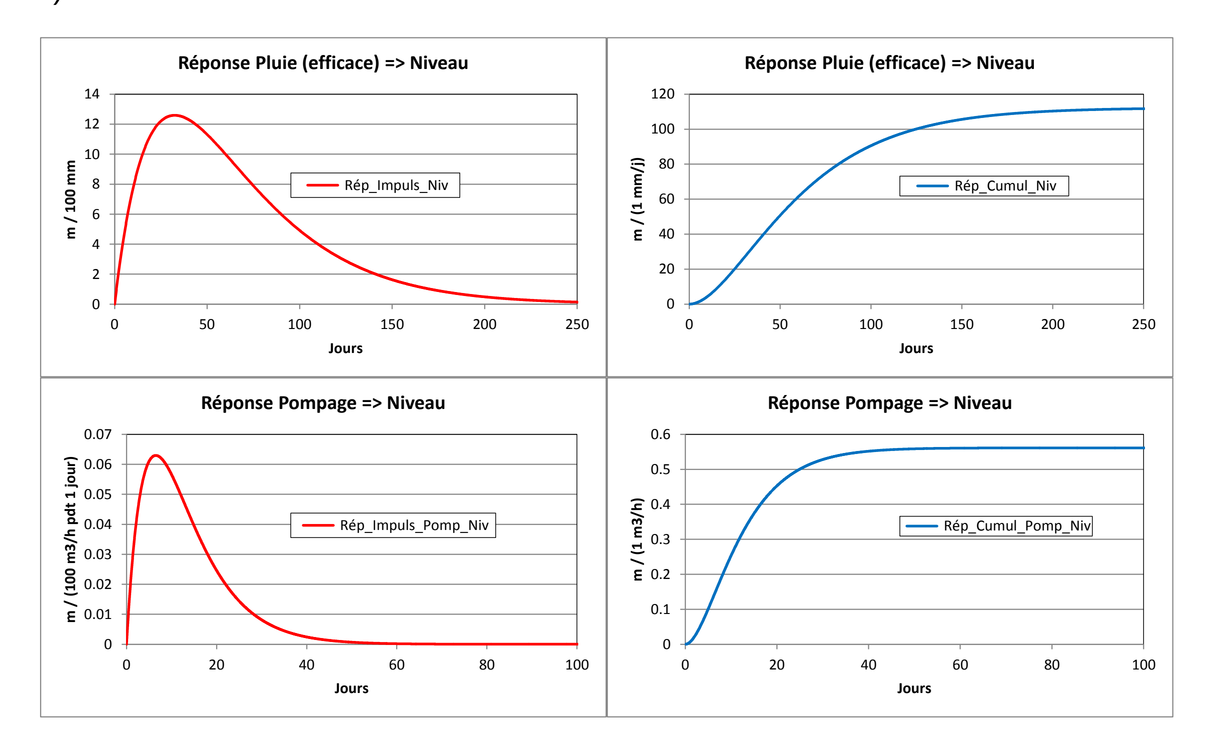


Figure 31 – Exemple de « réponses impulsionnelles » dessinées à partir du fichier « reponse_impuls.prn ».

4. Mise en forme des données temporelles Utilisation du module « Shalimar »

Les données hydroclimatiques utilisées par le code de calcul GARDÉNIA peuvent être au choix de l'utilisateur :

- Au format « Excel_Date » qui est un format texte exporté d'Excel © avec dates.
- Sous forme « formatée » au pas de temps journalier, décadaire (10 jours) ou mensuel. Sous cette forme les données doivent être formatées selon un format spécifique.
- En « format libre » (déconseillé).

Pour faciliter l'introduction de ces données (et pour éviter des erreurs), il est recommandé d'utiliser le module « Shalimar » installé avec la distribution (Figure 32).

4.1. DONNÉES FORMATÉES : MODULE SHALIMAR

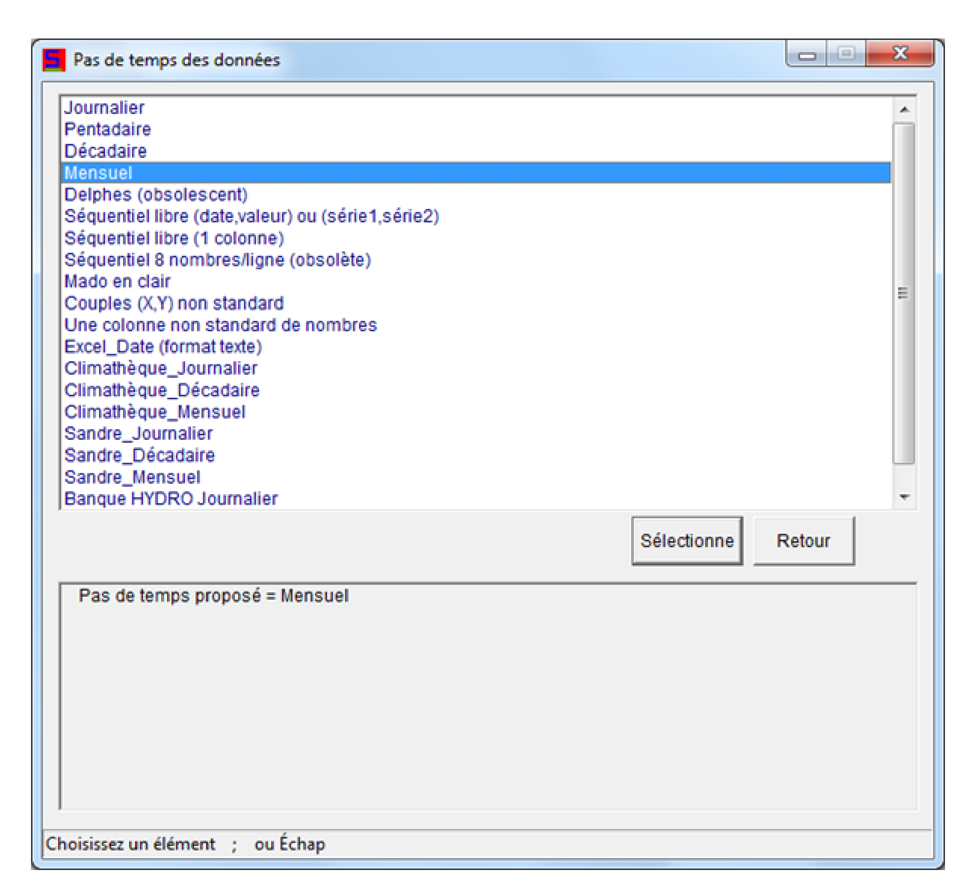


Figure 32 - Module Shalimar : définition du pas de temps d'une série lue.

4.1.1. Types de données

On distingue les valeurs qui sont nulles (valeur = 0) des valeurs correspondant à des observations absentes qui sont signalées par un code (Figure 33) :

- Code : -2 pour les débits (car les débits observés ne sont jamais négatifs) ;

- Code : 9999 pour les niveaux (c'est-à-dire une valeur très grande hors borne);
- Code : (0 pour les pluies…, car les séries de données climatiques ne doivent pas contenir de valeurs absentes).

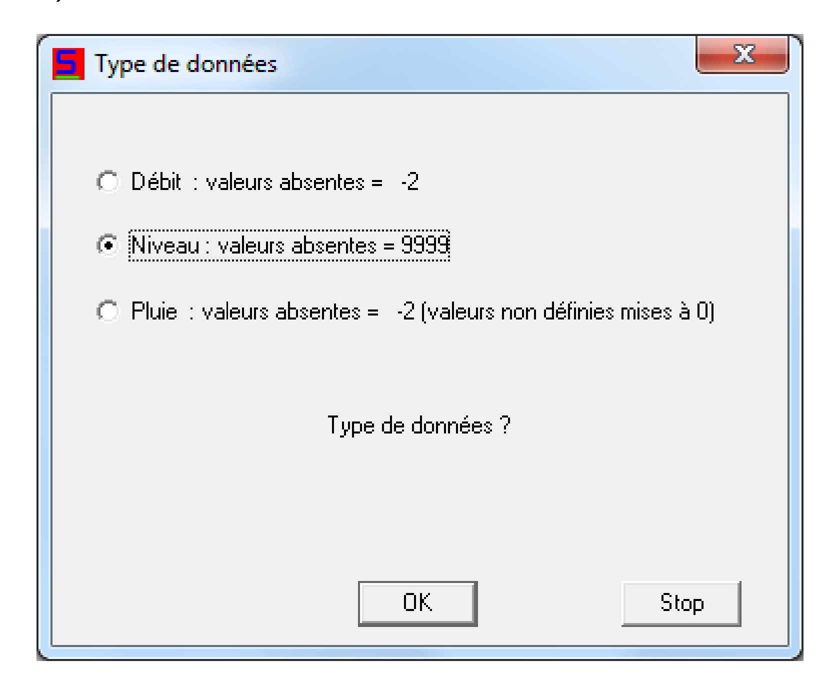
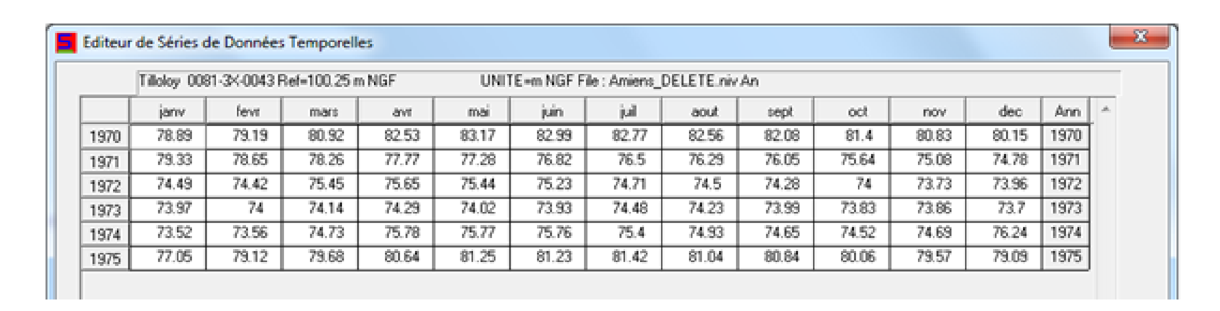


Figure 33 - Module Shalimar : définition du codage des valeurs manquantes.

Comme pour certains types de données, ces valeurs nulles peuvent être très fréquentes (c'est le cas de la pluie), la tâche de l'utilisateur est facilitée par le fait qu'il n'est pas obligé de rentrer la valeur 0 chaque fois que cela s'avèrerait nécessaire.

Pour l'option 3, Shalimar mettra automatiquement une valeur égale à 0 pour les pas de temps qui n'ont pas de valeur correspondante définie.

La Figure 34 présente le tableur du logiciel Shalimar.



Editeur de Séries de Données Temporelles

Tilloloy 0081-3X-0043 Ref=100.25 m NGF UNITE=m NGF File : Amiens_DELETE.niv An

	janv	fevr	mars	avr	mai	juin	juil	aout	sept	oct	nov	dec	Ann
1970	78.89	79.19	80.92	82.53	83.17	82.99	82.77	82.56	82.08	81.4	80.83	80.15	1970
1971	79.33	78.65	78.26	77.77	77.28	76.82	76.5	76.29	76.05	75.64	75.08	74.78	1971
1972	74.49	74.42	75.45	75.65	75.44	75.23	74.71	74.5	74.28	74	73.73	73.96	1972
1973	73.97	74	74.14	74.29	74.02	73.93	74.48	74.23	73.99	73.83	73.86	73.7	1973
1974	73.52	73.56	74.73	75.78	75.77	75.76	75.4	74.93	74.65	74.52	74.69	76.24	1974
1975	77.05	79.12	79.68	80.64	81.25	81.23	81.42	81.04	80.84	80.06	79.57	79.09	1975

Figure 34 - Tableur du module Shalimar : exemple de données mensuelles.

4.1.2. Description du format des données temporelles formatées

Toutes les données temporelles (données hydroclimatiques) ont la même structure de « bloc de données ». Un bloc de données est composé :

a) pour les données décadaires et mensuelles :

- D'une ligne titre (80 caractères) précisant le type de données, les unités, le lieu, la période, etc.,
- Suivie par année de :
  · 3 lignes de 12 valeurs pour 36 décades par an, si les données sont décadaires,
  · 1 ligne de 12 valeurs pour 12 mois par an, si les données sont mensuelles.

Chaque ligne contient 12 valeurs codées chacune sur 6 colonnes (caractères), soit 72 colonnes par lignes :

Exemples : 8 années décadaires = 25 lignes

15 années mensuelles = 16 lignes

b) pour les données journalières :

- D'une ligne titre (80 caractères maximum) par année,
- Suivie de 31 lignes contenant chacune les 12 valeurs des 12 mois d'un jour donné,
- Chaque valeur est codée sur 6 colonnes.

N.B.

1) Dans tous les cas, chaque année doit être complète, c'est-à-dire comporter 365 ou 366 jours, ou 36 décades, ou 12 mois. Il convient de remarquer que les pas de temps décadaires et mensuels introduisent un biais, puisque les décades et les mois ont des durées différentes au cours de l'année.

2) Les données décadaires se présentent :

- Soit sous forme « séquentielle », c'est-à-dire qu'apparaissent successivement sur la même ligne les 3 décades d'un même mois : la première ligne comprend donc les mois de janvier à avril, la deuxième de mai à août et la troisième de septembre à décembre ;
- Soit sous forme « annuaire », la première ligne contient la 1re décade des 12 mois, la deuxième ligne les 2èmes décades des 12 mois, la troisième ligne les 3èmes décades.

4.2. DONNÉES EN FORMAT « EXCEL_DATE » OU EN FORMAT LIBRE

4.2.1. Données temporelles en format « Excel_Date »

Avec ce format, il y a un couple « date valeur » par ligne.

La date **n'est pas lue**, mais doit avoir à une forme « compatible » Excel ©, c'est-à-dire avec les numéros de jour, mois et année séparés par un « / » et l'heure éventuelle sous la forme hh:mm. Seul ce format « numérique » de date est reconnu, à l'exclusion de types genre « 13 mars 2013 ».

La valeur est séparée de la date par au moins un espace.

Des données sous cette forme peuvent être obtenues par *exportation* d'un fichier Excel © [*.xlsx] en format « texte séparateur espace [*.prn] ». (Un fichier binaire *.xlsx ne peut pas être lu directement).

Il convient de noter également que :

- La première ligne du fichier doit être un titre descriptif ;
- Le séparateur décimal des valeurs doit être un « point décimal » et non pas une virgule.

Exemple de données « mensuelles » en format « Excel_Date » :

```
Évapotranspiration Potentielle "mensuelle"  2011/2013
            15/01/2005         9.00000
            14/02/2005   14:37   13.00000
            16/03/2005   18:40   35.00000
            15/04/2005        72.00000
            14/05/2005       103.00000
            etc.
```

Exemple de données journalières en format « Excel_Date » :

```
Pluie journalière : Station 1  2011/2013
            01/01/2005          17.10000
            02/01/2005           0.00000
            03/01/2005           4.70000
            04/01/2005           0.30000
            05/01/2005          13.30000
            etc.
```

Remarques complémentaires pour le format « Excel_Date » ou le « format libre » :

- Dans tous les cas, le fichier commence par un titre descriptif ;
- Il doit avoir le nombre de données nécessaire et suffisant correspondant au pas de temps (puisque les dates ne sont pas lues). Les éventuelles valeurs manquantes seront remplacées une « valeur manquante » ;
- Chaque année, y compris la dernière, doit être complète ;
- En format journalier, il y a 365 ou 366 valeurs par an selon si l'année est bissextile;
- Les années ne sont pas séparées les unes des autres par des titres ou au autre ;
- Dans tous les cas, les données sont séquentielles c'est-à-dire que chaque année va du jour n°1 au jour n°365, ou bien de la décade n°1 à la décade n°36, etc.

4.2.2. Données temporelles en « format libre »

Le format libre est déconseillé car, étant peu lisible, il ne permet pas facilement la détection des erreurs. Il peut être donné sous deux formes :

- Le format libre en colonne :

  Exemple de données mensuelles en format libre en colonne :

```
Pluviométrie Mensuelle à : La Neuvilleroy 2011-2013
53.0000000
39.0000000
64.0000000
9.00000000
54.0000000
etc.
```

- Le format libre quelconque :

  Il peut y avoir plusieurs valeurs par ligne, à condition qu'elles soient séparées par un (ou plusieurs) espaces.

  Exemple de données mensuelles en format libre quelconque :

```
Pluviométrie Mensuelle à : La Neuvilleroy 2011-2013
  53  39         64
  9    54    49    79     33    32
 120       73 52
  84 52 4    59
 etc.
```

Les données étant lues année par année, il conviendra, si on utilise ce format libre quelconque, de toujours commencer une année sur une nouvelle ligne.

5. Exemple d'utilisation de GARDÉNIA Le bassin des Ondes

5.1. LE BASSIN DES ONDES

La période de calcul commune aux différentes données correspond à la période 1964-1968.

a) Précipitations : ce sont des relevés décadaires de la Météorologie nationale à la station d'Huparlac, commune située sur la bordure sud du bassin versant. Les données de 1963 ont été recueillies en outre pour initialiser le modèle (fichier *onde.plu*).

b) Évapotranspiration : l'ETP est décadaire, calculée de 1963 à 1968 par la méthode de Turc (1961), à partir des données climatiques de la station de Millau (fichier *onde.etp*).

c) Débits : les débits de 1964 à 1968 sont extraits de l'annuaire de l'Agence de Bassin Adour-Garonne pour constituer des fichiers décadaires (fichier *onde.deb*).

- **Les paramètres imposés du modèle**

Afin d'obtenir une calibration rapide et convenable du modèle GARDÉNIA, il convient d'une part d'initialiser les paramètres du modèle avec des valeurs plausibles, d'autre part de diminuer le nombre de ceux qui doivent être optimisés automatiquement.

Pour le cas étudié, les paramètres fixés sont la superficie, qui est de 36 km^2, et les corrections de pluie et d'ETP fixées à 0.

- **Critique des bilans calculés**

La simulation a été effectuée sans facteur correctif sur l'ETP.

Le meilleur ajustement (Figure 35) avec un coefficient de Nash = 0.785 (coefficient d'ajustement = 0.914) a été obtenu avec les paramètres de calculs suivants :

- Capacité de la réserve superficielle : 88 mm
- Hauteur d'équi-ruissellement : 37 mm
- Temps de ½ percolation : 1.68 mois
- Temps de ½ tarissement : 1.56 mois.

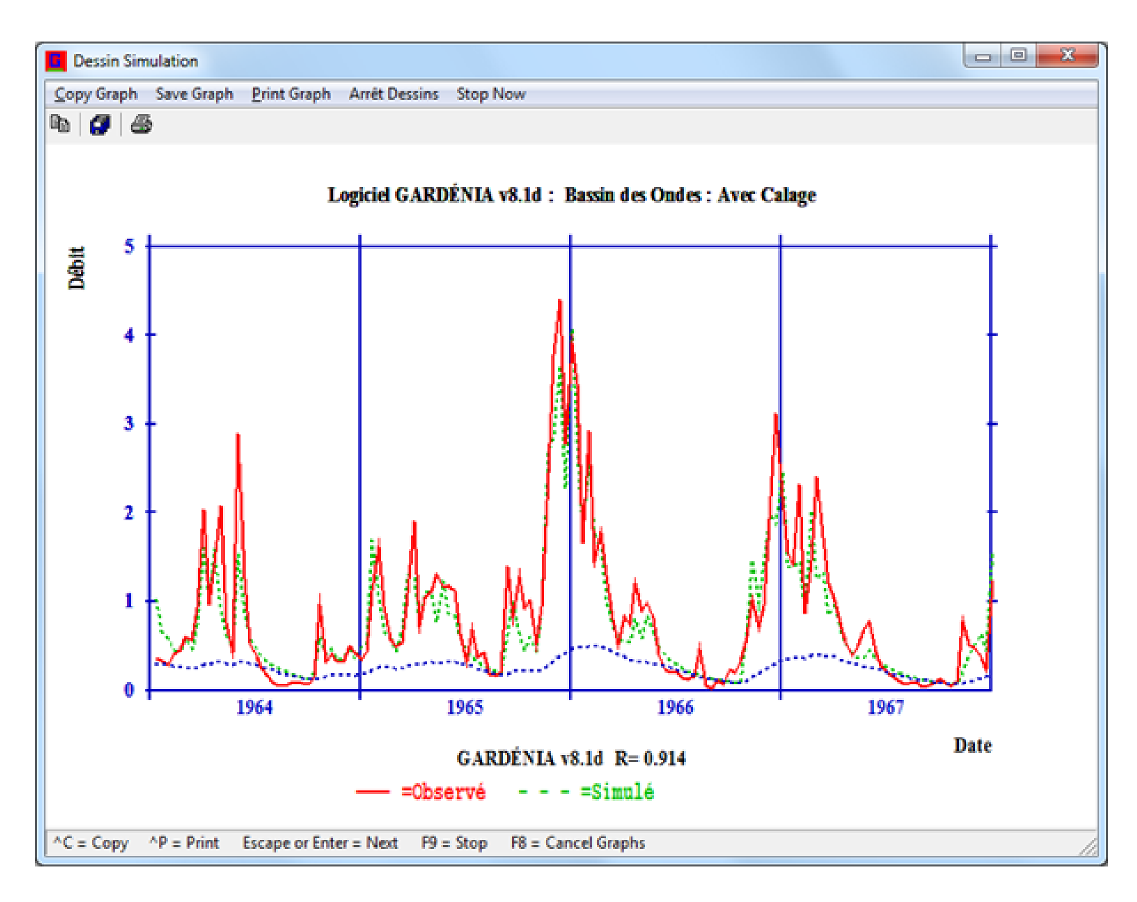


Figure 35 - Bassin des Ondes : comparaison des débits observés et simulés (coefficient de corrélation égal à 0.914)

En terme global, le temps de demi-tarissement de la composante lente du débit est assez rapide (1.5 mois). La proportion moyenne d'écoulement rapide estimée après calibration représente 33 % des précipitations. La lame de recharge moyenne est évaluée à 229 mm, soit 17.5 % des précipitations, ce qui est plausible compte tenu des conditions morphologiques du bassin. Il faut cependant, comme on l'a expliqué plus haut, être extrêmement prudent quant à l'interprétation des deux composantes de l'écoulement (écoulement rapide et écoulement lent). L'écoulement lent est … plus lent que l'écoulement rapide, mais il n'y a pas de certitude qu'il s'agisse d'un écoulement souterrain.

Fichiers utilisés :	en entrée :	en sortie :
	• Onde.gar	• gardepara.out
	• Onde.plu	• tabl_param.prn
	• Onde.etp	• minmaxmoy.prn
	• Onde.deb	• moybilan.prn
		• tabl_criter.prn

Fichier des pluies : onde.plu

```
      Pluie décadaire à HUPARLAC                1963/1967           UNITE= mm
 21.8  37.7  38.9  11.6  42.1  23.8  26.8  37.7  48.5  24.6    46  25.1 1963 1
 38.5  50.6  62.6  24.3  17.5  21.3  33.8  20.9   9.3  24.5    22  30.9 1963 2
   28  24.9  48.7  47.9  44.5  31.7  65.4  45.5    48  55.1  29.3  75.4 1963 3
    0   0.9    19   2.7  23.5    35    17    48    77  14.7  79.4  25.3 1964 1
  7.7     3 190.1  32.2   6.2  32.1   4.8     0   2.6   2.8  41.9  20.1 1964 2
 51.4  26.3   3.6 124.4  56.5   7.2  29.8   8.2  17.6  21.7   1.2  25.2 1964 3
 16.2  87.5    16     0  13.5   2.9  31.9  66.8  58.3  15.2  60.6  42.8 1965 1
 35.7  85.1  39.6  42.9  13.7   0.9  76.3  39.8  25.2  10.3  24.3    41 1965 2
154.9    70  14.6   0.4  64.4   5.5  65.6 119.6  82.4 112.1  43.8   135 1965 3
 57.1  23.3  87.6  36.6  39.3  12.4   3.5   3.8  45.6  32.7  56.6  14.9 1966 1
 63.6  30.3   6.5   2.1  45.2   2.4  38.5    49   3.9  16.4   1.5  72.8 1966 2
    7  17.6  40.2  49.5  58.3  74.6  74.2    17    57    68    51    81 1966 3
   12    37    46     0  95.4  21.5  46.9  14.6  46.9  18.3   0.9   7.2 1967 1
 37.7  65.7  54.8  22.3   3.3  38.6  21.5   4.6   1.8  68.7  14.6   0.4 1967 2
 24.5  33.7  33.8  15.5   2.1  47.8  90.9  34.3    30  24.7   2.7  85.8 1967 3
```

Fichier des ETP : onde.etp

```
      ETP décadaire à MILLAU                     1963/1967           UNITE=mm
  5.3   0.3     0     0   5.3     0  15.3  15.1  12.3  12.3  21.6  22.9 1963 1
 34.5  30.2    38  30.8    38  40.8  46.1  41.5  50.1  30.3  29.1  37.8 1963 2
 21.3    16  27.6    18  21.1  18.9  12.3   6.5  10.6   8.8     0   3.3 1963 3
  2.8   5.8   1.3   8.9   8.4  10.8  13.5  14.5   6.5  10.3  18.2  29.1 1964 1
 34.5  46.9  32.2  42.4    41  45.3  46.3  54.3  56.2  39.8  37.1  43.2 1964 2
 28.1  27.4  25.9  18.3    12  12.7   8.6   9.3   4.2   3.6   3.5   0.2 1964 3
    0   2.4   5.2   3.1     0   2.9     0   9.4  26.7  20.2  13.5  15.2 1965 1
 30.6  36.3  31.7  23.8  50.4  50.5  42.8  42.7  42.8  45.7  40.6  36.5 1965 2
 16.8  27.1  19.1  22.1  13.8  13.3   9.8   5.3   3.3     4   6.1   2.8 1965 3
  4.8     0   6.9   9.7   6.3  10.2  12.2  14.6    16  23.1  21.9  17.6 1966 1
 27.5  23.9  50.6  39.5  44.3  44.4  47.8  33.9  43.6  39.7  36.4  32.3 1966 2
 40.9  32.1  25.4  17.3  13.5  10.6     6   2.8   2.3   2.3     3     4 1966 3
    0   1.9   7.5   6.5   2.8  10.9  10.9  16.1  15.8  17.5    29  21.8 1967 1
 26.2  26.2  36.1    35  34.9  47.8  47.7  52.8  56.9  34.3  41.5  46.2 1967 2
 29.7  19.4  23.3  22.8  19.2  13.5   6.7  10.6   8.1     0     0   2.3 1967 3
```

Fichier des débits : onde.deb

```
     Débits moyens décadaire , Les Ondes    1963/1967           UNITE=m3/s
1.448 0.884 0.464 0.369 1.484  0.75 1.752 2.822 2.504 2.041  2.04 1.477 1963 1
 0.72 0.444 0.599 1.671 1.066 0.877 0.517 0.433 0.173 0.256 0.739 0.465 1963 2
0.369 0.803 0.934  0.64  0.47 0.536 1.011 1.415 1.229 0.877 0.561  0.36 1963 3
0.368  0.34 0.283 0.409 0.448 0.594 0.563  0.93 2.035  0.96  1.43 2.072 1964 1
 0.76 0.415  2.89 1.267 0.524 0.395 0.246 0.163 0.074 0.053 0.059 0.077 1964 2
0.098 0.083 0.066 0.156 0.974 0.312 0.414 0.322 0.324 0.489 0.422 0.347 1964 3
0.438 1.119 1.614 0.947 0.564   0.5 0.543 1.089 1.894 0.718 1.041 1.114 1965 1
1.312 1.159  1.18 1.116 0.632 0.318 0.688 0.377 0.425 0.181 0.177 0.202 1965 2
1.394 0.816 1.281 0.921  1.02 0.523 0.932 2.448 3.775 4.395 2.752 3.909 1965 3
3.451 1.647 2.918 1.443 1.779 1.301 0.801 0.524 0.841 0.737 1.213   0.9 1966 1
 0.98 0.826 0.393 0.228 0.203 0.194  0.14  0.13  0.15 0.461 0.053 0.023 1966 2
0.112 0.066  0.23 0.196 0.313 0.605 1.017 0.714 0.959 2.186 3.118 2.182 1966 3
1.552 1.408  2.32 0.853 1.462 2.409 1.722 1.201 1.004 0.765 0.533 0.392 1967 1
0.477 0.688  0.78 0.431 0.272 0.201 0.155 0.115  0.06 0.082 0.089  0.04 1967 2
0.048 0.082 0.121 0.074 0.053 0.089 0.774 0.511 0.474 0.378 0.223 1.232 1967 3
```

Figure 36 - Fichiers de séries hydrologiques.

6. Validation des lois physiques de GARDÉNIA

Ce chapitre a pour objet de montrer que les lois décrivant le fonctionnement du code de calcul GARDÉNIA correspondent à une simplification des lois physiques complexes régissant les écoulements dans un bassin versant réel.

Le but de cette validation est de montrer que le schéma de fonctionnement du code de calcul GARDÉNIA n'est pas de type « boîte noire » ou « traitement du signal » mais correspond un schéma physique simplifié ce qui est un gage important de robustesse. La robustesse est la capacité à produire des simulations fiables y compris dans des conditions de fonctionnement (sécheresses, changement climatique) différentes de celles de la période de calibration.

Cette validation est réalisée principalement par comparaison avec des résultats de modélisation d'hydrosystèmes réels avec le code de calcul MARTHE (Thiéry 1990, 1993, 2010a, 2010c) qui utilise une approche physique, avec une discrétisation par volumes finis, selon la loi de Darcy en milieu saturé et non saturé.

Cinq exemples de validation sont présentés :

- Modélisation des données d'un lysimètre recouvert de végétation et suivi pendant plus d'un an et demi : validation du schéma de calcul de l'ETR et du schéma de percolation. Comparaison avec des mesures de drainage et des mesures de teneur en eau par sondes à neutrons.
- Modélisation de parcelles expérimentales de sol nu ou avec culture de maïs pendant 3 ans : validation du schéma de calcul de l'ETR et du schéma de percolation. Comparaison avec des mesures de drainage et des mesures de teneur en eau par sondes à neutrons.
- Modélisation des variations de niveau d'une nappe fortement influencée par des pompages proches : validation du schéma de calcul de l'influence de pompages. Comparaison avec la modélisation avec le code MARTHE de l'influence des pompages.
- Modélisation des débits à l'exutoire d'un bassin versant avec une forte composante souterraine : validation du schéma de calcul des écoulements souterrains. Comparaison avec les débits calculés avec le code MARTHE dans un aquifère à transmissivité et coefficient d'emmagasinement uniformes.
- Modélisation d'un bassin versant avec des mesures de débits à l'exutoire et ayant un niveau de nappe présentant des fluctuations de plus de 20 mètres d'amplitude en réaction aux pluies efficaces : validation du schéma de calcul des débits et des niveaux piézométriques. Comparaison avec les niveaux et débits calculés avec le code discrétisé MARTHE dans un aquifère traversé par un cours d'eau spatialisé avec propagation amont - aval.

6.1. VALIDATION DU SCHÉMA DE CALCUL D'ÉVAPOTRANSPIRATION DANS LE SOL ET DE PERCOLATION. ÉCOULEMENT DANS UN LYSIMÈTRE

Cette application montre la possibilité de simuler des écoulements à travers un sol non saturé. Elle permet de valider le schéma de bilan de Gardénia pour simuler l'évaporation dans le sol à partir des pluies et des ETP.

Les données de cet exemple proviennent d'un ensemble de cinq grands lysimètres de 1.1 mètre de haut et de 1 m^2 de surface soumis à des cultures de céréales et suivis pendant une période de 21 mois (Herbst et al. 2005).

Cinq monolithes de sol non perturbé (lysimètres à drainage libre) contenant un Luvisol orthique ont été utilisés pour suivre le bilan hydrique du sol. Les monolithes avaient une profondeur de 1.1 m et une surface de 1.0 m^2. Du blé d'hiver a été semé en premier avec une période de pré-germination en novembre 1988. Pendant la période de végétation suivante, c'est de l'orge d'hiver (Hordeum vulgare L.) qui a été semé puis récolté le 11 mai 1990. La culture suivante était de l'avoine (Avena sativa L.), qui a été récolté le 13 août 1990. Pendant les 627 jours de la période du 25 novembre 1988 au 13 août 1990, les précipitations, l'humidité de l'air, la température de l'air, la vitesse du vent et le rayonnement ont été suivis sur une base quotidienne. La teneur en eau du sol a été mesurée environ tous les 4 à 5 jours avec une sonde à neutrons à différentes profondeurs. Le drainage du lysimètre a pu être mesuré directement, tandis que l'évapotranspiration réelle ETR (mm) a été calculée à partir du bilan hydrique des sols :

ETR = Pluie – Drainage – Diff_Stock

6.1.1. Modélisation avec le code MARTHE

Ces données ont été modélisées avec différents codes de calcul et en particulier avec le code de calcul MARTHE du BRGM. Les Figure 37 à Figure 41 montrent que le code MARTHE permet de simuler correctement le cumul de l'ETR, le cumul du drainage, les teneurs en eau à 25 cm et à 85 cm, ainsi que la variation de stock en eau dans le sol (estimée à partir des mesures disponibles à 25 cm et 85 cm).

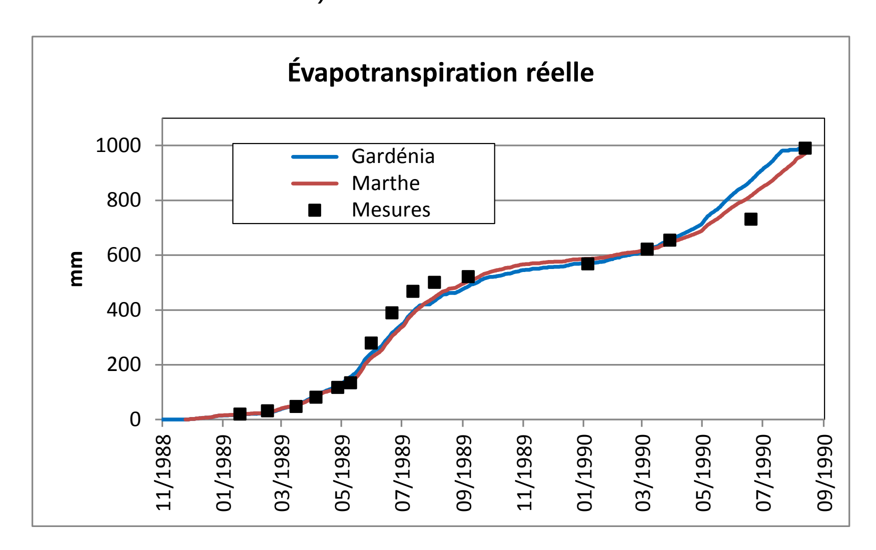


Figure 37 – Lysimètre : cumul de l'évapotranspiration réelle

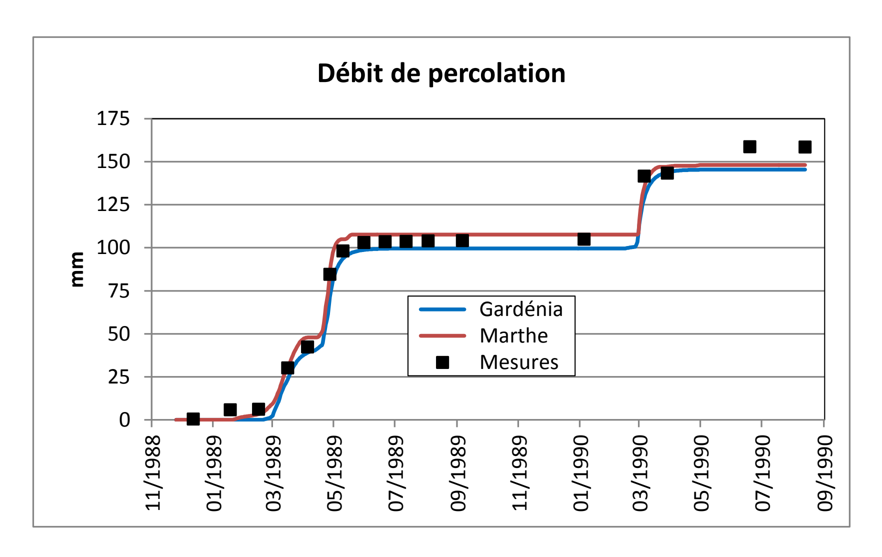


Figure 38 – Lysimètre : cumul du débit de drainage

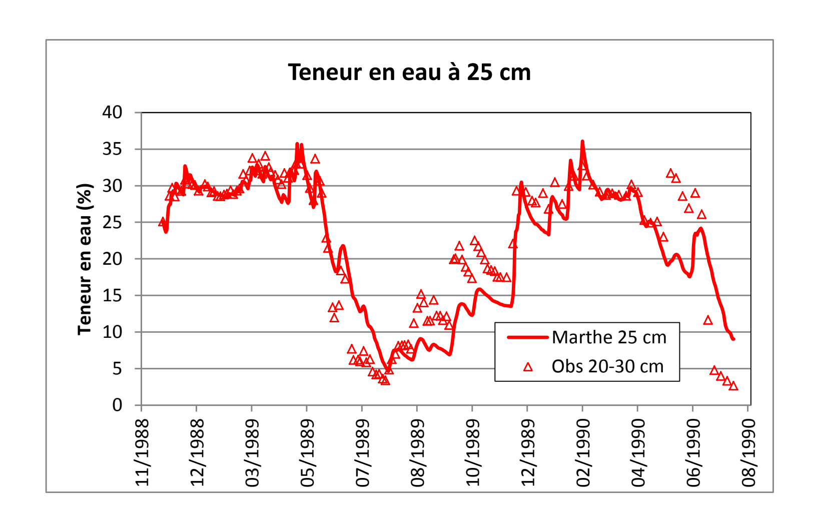


Figure 39 – Lysimètre : teneur en eau à 25 cm de profondeur

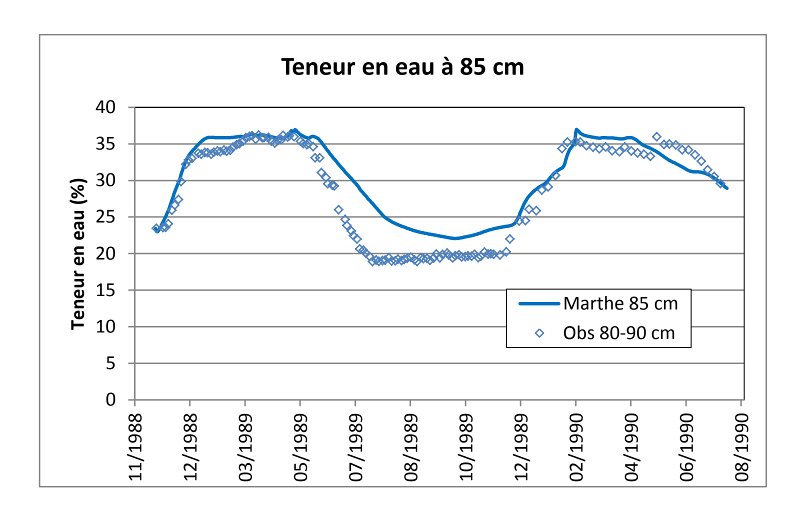


Figure 40 – Lysimètre : teneur en eau à 85 cm de profondeur

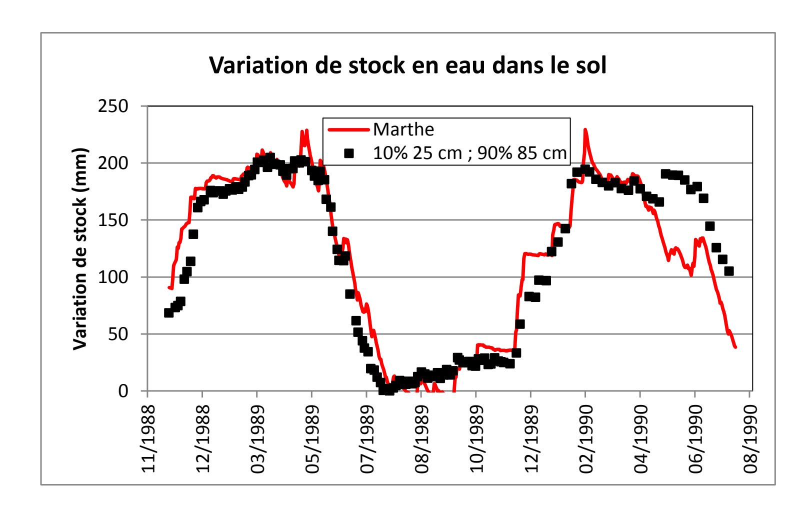


Figure 41 – Lysimètre : variation du stock en eau, estimé à partir d'une pondération entre les teneurs en eau à 25 cm (10 %) et à 85 cm (90%).

6.1.2. Modélisation avec le code GARDÉNIA

Comme le code MARTHE permet de reproduire le bilan d'eau et les écoulements dans le lysimètre, on a calibré le code GARDÉNIA sur les débits de drainage calculés. Les Figure 42 à Figure 44, et aussi les Figure 37 et Figure 38, montrent que la simulation par le code GARDÉNIA donne des résultats proches de celles du code MARTHE en termes de débit de drainage, mais aussi en termes d'évapotranspiration réelle (ETR) et de stock en eau.

La capacité de la réserve superficielle « réserve utile » est égale à 179 mm. Le coefficient d'ajustement sur le débit de drainage est égal à 0.906 (coefficient de Nash égal à 0.82), et le biais de simulation est égal à -1.7 %.

Ceci constitue une validation des schémas de fonctionnement du code GARDÉNIA.

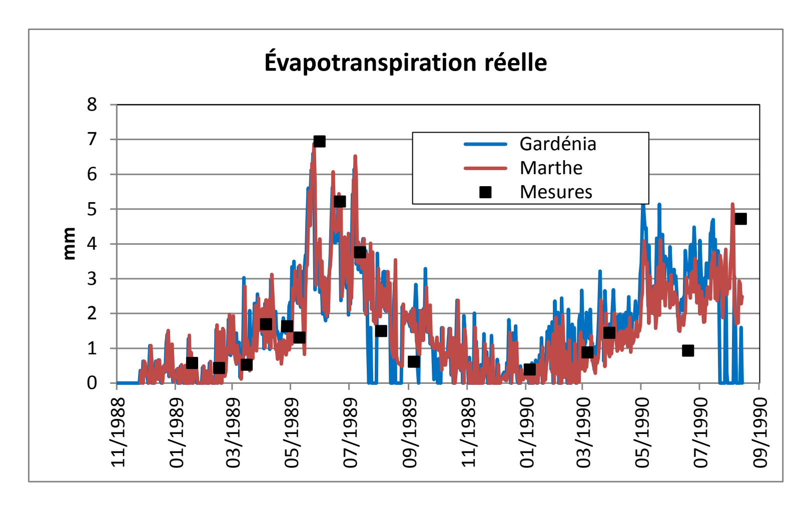


Figure 42 – Lysimètre : Validation de l'ETR calculée par GARDÉNIA par comparaison avec les valeurs mesurées et calculées avec le code MARTHE

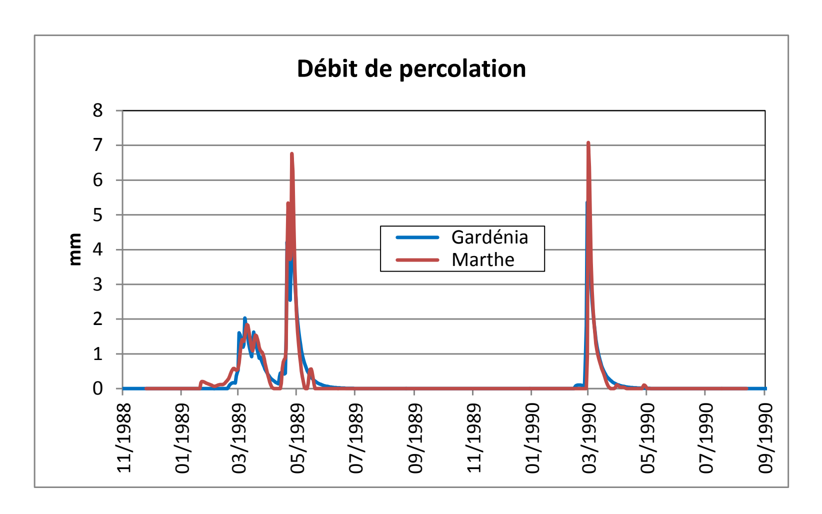


Figure 43 – Lysimètre : Validation du débit de drainage calculé par GARDÉNIA par comparaison avec les valeurs calculées avec le code MARTHE

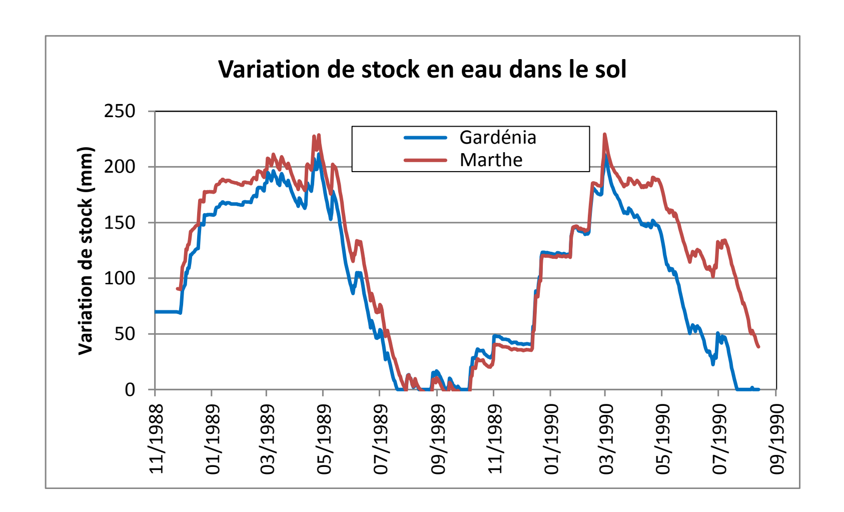


Figure 44 – Lysimètre : comparaison des variation de stock en eau dans le sol calculées par les codes GARDÉNIA et MARTHE

6.2. VALIDATION DU SCHÉMA DE CALCUL D'ÉVAPOTRANSPIRATION DANS LE SOL. ÉCOULEMENT À TRAVERS UNE PARCELLE EXPÉRIMENTALE

Cette application montre la possibilité de simuler des écoulements à travers la zone non saturée. Elle permet également de valider le schéma de bilan de Gardénia pour simuler l'évapotranspiration dans le sol à partir des pluies et des ETP.

Les données de cet exemple proviennent du site expérimental de « La côte Saint André » en Isère ; elles nous ont été fournies gracieusement par le LTHE de Grenoble, et en particulier par Béatrice Normand que nous remercions.

Les données concernent deux parcelles de sol : une parcelle en sol nu et une parcelle cultivée avec du maïs. Le bilan hydrique a été suivi pendant les années 1991 à 1993. Pendant la période de culture, les variations de teneur en eau et de succion, en conditions naturelles, ont été suivies sur une épaisseur de 80 cm, et le débit de drainage a été mesuré à la profondeur de 80 cm.

L'évapotranspiration réelle a alors été déterminée par bilan, connaissant le débit de percolation et la variation de stock total dans la tranche de 80 cm.

Pour chaque année on dispose de mesures pendant 30 à 60 jours. Ces données concernent :

- Les teneurs en eau à 8 profondeurs
- Les succions à 5 profondeurs
- Le débit de drainage
- L'évapotranspiration réelle calculée.

Pour obtenir une série continue de débits sur toute la période 1991-1993, on a modélisé le site de manière physique avec le code de calcul MARTHE du BRGM. Cette modélisation a permis d'obtenir une très bonne simulation des teneurs en eau, des succions, des évapotranspirations et du drainage. On a utilisé la série du drainage calculé par le code de calcul MARTHE pour calibrer les paramètres du modèle GARDÉNIA en simulation Pluie – Débit de drainage.

On dispose sur la période 1991-1993 des données journalières continues de :

- ETP journalière (mm/j)
  Pour le sol nu (« bare soil ») et pour le sol cultivé :
- Précipitations (+ irrigations) (mm/j)
- Drainage calculé par le code de calcul MARTHE (mm/j)

La modélisation de ce site avec GARDÉNIA est décrite en détails par Thiéry (2013).

6.2.1. Résultats obtenus sur la parcelle de sol nu

La calibration automatique, sur la période 1991-1993, permet d'obtenir une simulation excellente avec le code GARDÉNIA (Figure 45) : le coefficient d'ajustement est égal à 0.95. Le biais de simulation est égal à -0.015 mm/j soit un peu moins de 1% du débit moyen. La capacité de la réserve sol (réserve utile) est égale à 11 mm, valeur assez faible mais qui s'explique parce que le sol est nu.

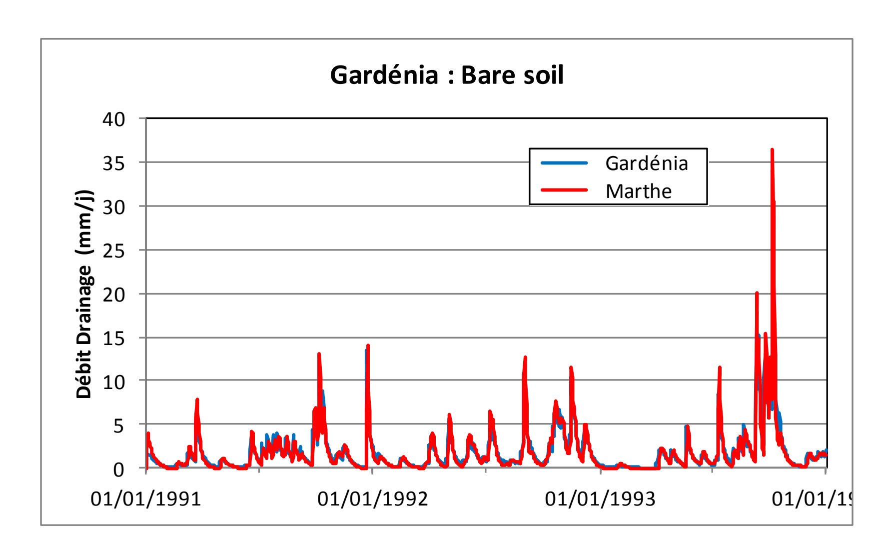


Figure 45 – Site de St André, sol nu : Débit de drainage simulé par GARDÉNIA et par MARTHE de 1991 à 1993.

La Figure 46 montre la comparaison des cumuls de l'évaporation + transpiration réelle et du drainage simulés par GARDÉNIA et observés par le LTHE en 1991, 1992 et 1993.

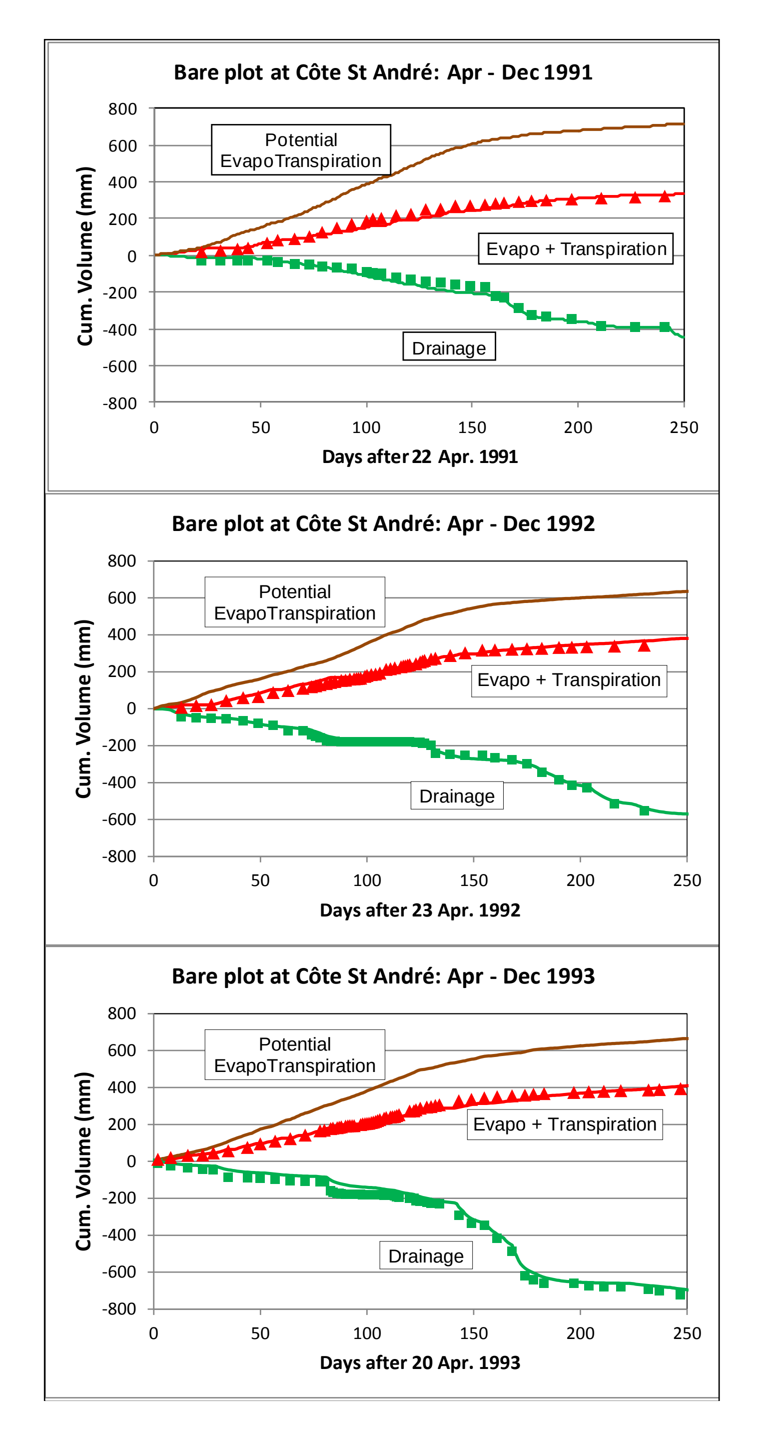


Figure 46 – Site de St André, sol nu : Cumuls des évaporation + transpiration réelle et du drainage. Comparaison des observations du LTHE (symboles) et des simulations par GARDÉNIA (traits).

6.2.2. Résultats obtenus sur la parcelle de maïs

En donnant un poids de 15 % sur la minimisation du biais de simulation, on obtient alors une simulation avec un coefficient d'ajustement égal à 0.926, avec un biais de simulation égal à 0. La capacité de la réserve sol (réserve utile) est égale à 25 mm, donc un peu augmentée à cause de l'influence des racines de la végétation.

La Figure 47 compare les évapotranspirations de 1993 simulées et observées pour la parcelle de sol nu et la parcelle de maïs. Le modèle GARDÉNIA permet de simuler correctement l'augmentation d'évapotranspiration du sol cultivé.

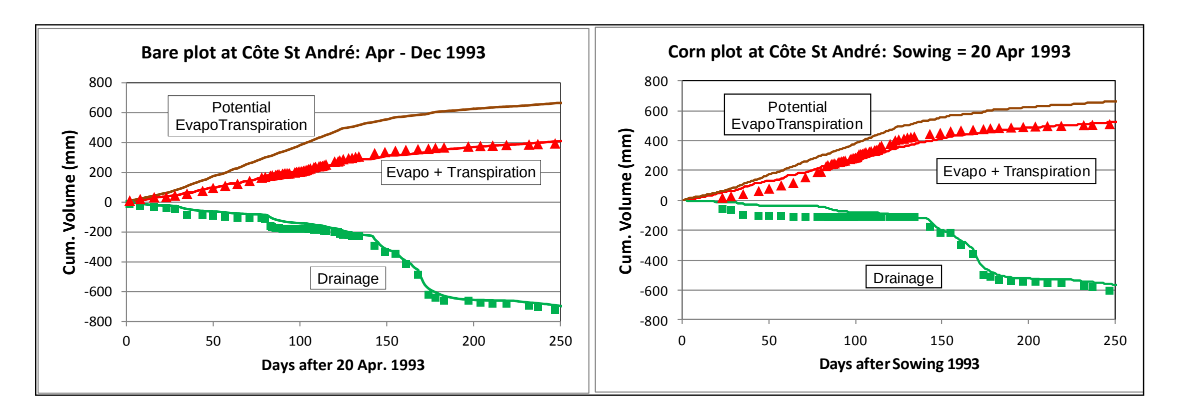


Figure 47 – Site de St André, année 1993 : Cumuls de l'évaporation + transpiration réelle et du drainage. À gauche : sol nu ; à droite parcelle de maïs. Symboles = Observations du LTHE; Traits = simulations GARDÉNIA.On note l'évapotranspiration plus importante pour la parcelle de maïs.

6.3. VALIDATION DU SCHÉMA DE MODÉLISATION DE L'INFLUENCE D'UN POMPAGE SUR UN NIVEAU DE NAPPE

Les données de base de cet exemple, relatives à un piézomètre situé près de la ville de Perpignan, ont été rassemblées et étudiées par Dagneaux (2010) et nous ont été mises à disposition par B. Ladouche et Y. Caballero du BRGM que nous remercions.

La nappe au point étudié est influencée à la fois par la recharge par les pluies efficaces et par des pompages proches.

Les données disponibles pour cet exemple sont les suivantes :

- Pluies journalières : août 1970 à juillet 2006 (36 ans)
- ETP journalière : août 1970 à juillet 2006 (36 ans)
- Niveau piézométrique journalier, avec quelques lacunes : février 1974 à novembre 2011 (38 ans). Les lacunes représentent environ 13% de la période.
- Somme des débits de pompage du secteur, au pas de temps mensuel : 1998 à 2007 (10 ans) en m^3.

6.3.1. Modélisation avec GARDÉNIA

La modélisation de ce site avec GARDÉNIA est décrite en détails par Thiéry (2013). Elle permet d'obtenir une simulation excellente : le coefficient d'ajustement est égal à 0.961. (Figure 48).

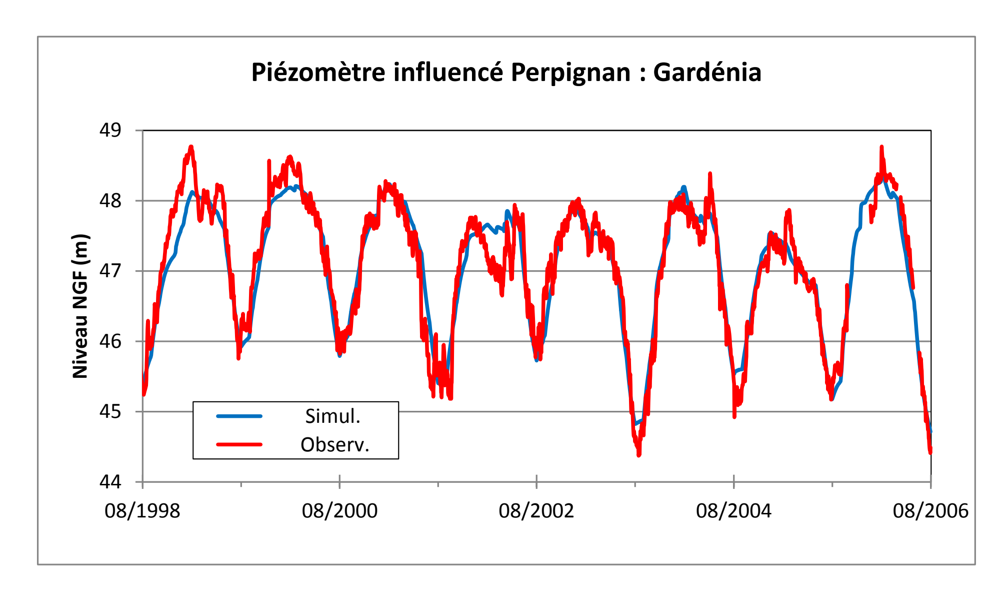


Figure 48 – Piézomètre Perpignan influencé par des pompages :
Niveaux journaliers observés et simulés

La modélisation permet de séparer l'effet de chacune des deux influences :

- L'influence des débits de pompage.
- L'influence de la pluie et de l'évapotranspiration.

6.3.2. Validation avec le code MARTHE du schéma GARDÉNIA de calcul de l'influence d'un pompage sur un niveau de nappe

Dans un but de validation du schéma GARDÉNIA de calcul de l'influence d'un pompage sur un niveau de nappe, on procède de la manière suivante :

- On définit un domaine aquifère homogène bordé par une rivière qu'on modélise avec le code de calcul hydrodynamique MARTHE de simulation d'aquifères par volumes finis selon la loi de Darcy.
- On introduit dans un puits de pompage l'historique des débits de pompage journalier de la période 1998-2006.
- On détermine alors la perméabilité uniforme et le coefficient d'emmagasinement uniforme qui permettent de reproduire le mieux possible, avec le code de calcul physique MARTHE, l'influence du pompage sur le niveau piézométrique, calculée avec GARDÉNIA de 1998 à 2006.

Le domaine choisi pour la modélisation hydrodynamique discrétisée a les caractéristiques arbitraires suivantes (Figure 49) :
- Carré de 2 km de côté, discrétisé en 10000 mailles de 20 m de côté
- La limite ouest, bordée par une rivière, a un niveau piézométrique imposé (à la cote 2 mètres).
- Les trois autres limites, à l'Est, au Nord et au Sud, sont étanches.
- Le piézomètre d'observation est situé à 80 mètres à l'est de la rivière, à mi- ordonnée, c'est-à-dire à 1 km des limites Nord et Sud.
- Le puits de pompage est situé à 580 mètres à l'est de la rivière, c'est-à-dire à 500 mètres à l'est du piézomètre.
- La nappe a une épaisseur uniforme de 50 mètres.

On détermine alors la perméabilité et le coefficient d'emmagasinement qui permettent de reproduire le mieux possible l'influence du pompage sur le niveau piézométrique, pendant les 3134 jours de la période de 1998 à juillet 2006.

La Figure 50 montre qu'avec un coefficient d'emmagasinement égal à 0.083 et une perméabilité égale à 8.44 10^{-5} m/s, soit une transmissivité de 4.22 10^{-3} m^2/s, on calcule une influence du pompage sur le niveau piézométrique très proche de celle obtenue avec GARDÉNIA.

Le fait de reproduire très bien avec GARDÉNIA l'influence du pompage sur le niveau de nappe calculé avec un modèle hydrodynamique physique, est une validation forte du schéma de GARDÉNIA pour le calcul de l'influence d'un pompage sur un niveau de nappe

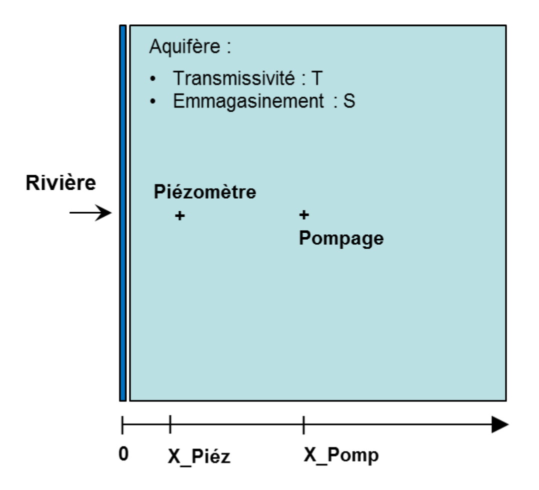


Figure 49 – Schéma physique modélisé avec le code de calcul MARTHE pour la validation des calculs avec GARDÉNIA de l'influence d'un pompage sur un niveau de nappe.

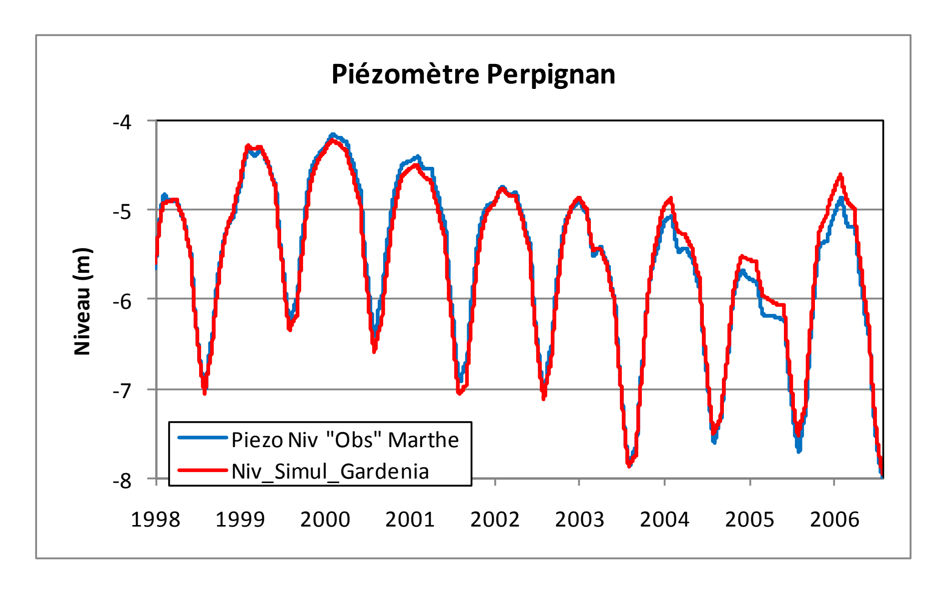


Figure 50 – Piézomètre Perpignan : comparaison de l'influence du pompage sur le niveau piézométrique calculé avec le code MARTHE (en rouge) et avec le code GARDENIA (en bleu).

6.4. VALIDATION DU SCHÉMA DE MODÉLISATION DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS

La validation est réalisée sur les débits de l'Austreberthe à Saint-Paër. Le bassin versant, d'une superficie de 157 km^2, est situé dans le pays de Caux (Seine Maritime). On dispose des données suivantes :

- Pluie décadaires à Rouen, de 1969 à 2006.
- Évapotranspiration potentielle (ETP) décadaire à Rouen, de 1969 à 2006.
- Débit moyen décadaire de l'Austreberthe à Saint-Paër, de mars 1997 à 2006.

6.4.1. Modélisation avec GARDÉNIA

La modélisation de ce site avec GARDÉNIA est décrite en détails par Thiéry (2013). Le coefficient d'ajustement est très élevé. Il est égal à 0.961 (soit un coefficient de Nash égal à 0.923), Figure 51.

La modélisation permet de décomposer le débit en deux composantes :
- La composante rapide.
- La composante lente correspondant à l'écoulement souterrain qui représente 90 % de l'écoulement (Figure 52).

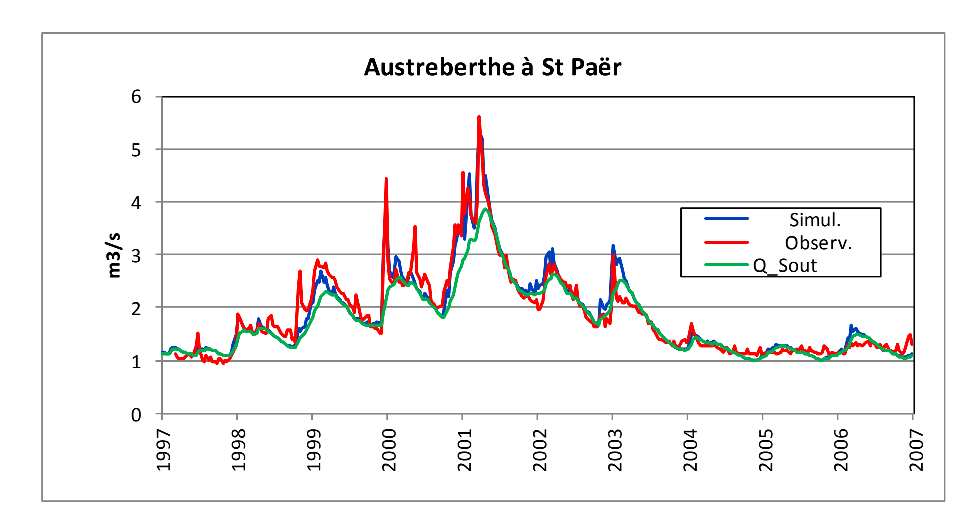


Figure 51 – Débit de l'Austreberthe à St Paër simulé par le code GARDÉNIA.

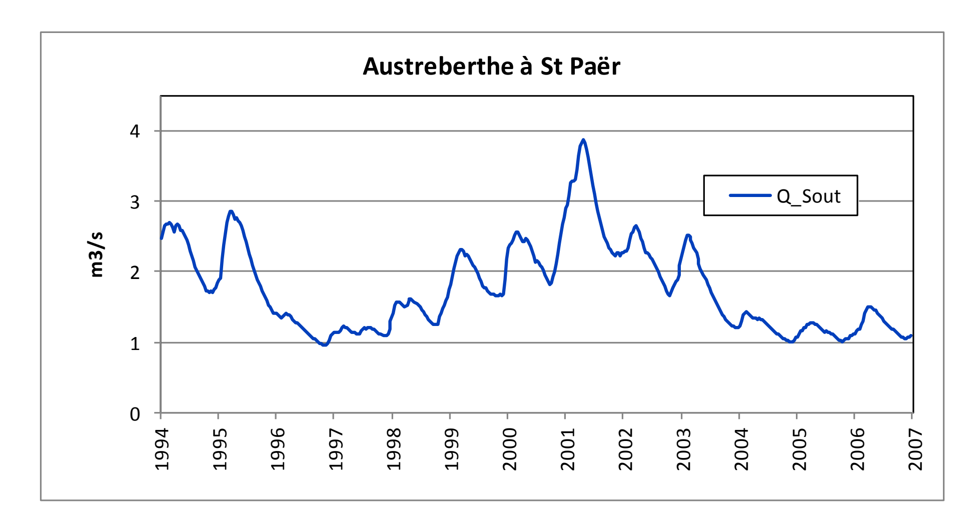


Figure 52 – Composante souterraine du débit de l'Austreberthe à St Paër calculée par le code GARDÉNIA.

6.4.2. Validation avec le code MARTHE du schéma GARDÉNIA de calcul des écoulements souterrains

Dans un but de validation du schéma de calcul de l'écoulement souterrain avec le code de calcul GARDÉNIA, on a procédé de la manière suivante :

- On a extrait la composante souterraine du débit, calculée par GARDÉNIA au pas de temps décadaire.
- On a extrait la recharge calculée par GARDÉNIA au pas de temps décadaire sur la période 1994-2007.
- On a alors introduit cette recharge dans le code de calcul hydrodynamique MARTHE de simulation d'aquifères par volumes finis selon la loi de Darcy. On a modélisé l'écoulement souterrain à l'exutoire d'un bassin versant de 157 km^2, ayant la forme d'un secteur de disque de 45°, c'est-à-dire un secteur formé par 1/8 de disque (Figure 53).
- On a alors déterminé les paramètres hydrodynamiques uniformes qui permettent de calculer avec le code de calcul physique MARTHE un débit souterrain décadaire le plus proche possible de celui obtenu avec GARDÉNIA.

Pour avoir une superficie de 157 km^2, un secteur de disque de 45° doit avoir un rayon de 20 km. On a modélisé le domaine d'étude en radial avec 40 mailles de 0.5 km de long et 45° de large. On a fixé arbitrairement un coefficient d'emmagasinement uniforme égal à 1 %. On a alors déterminé la transmissivité uniforme qui permet de simuler correctement, au pas de temps décadaire, le débit souterrain des 468 décades de 1994 à 2007. L'année 1994 a été utilisée comme période de démarrage.

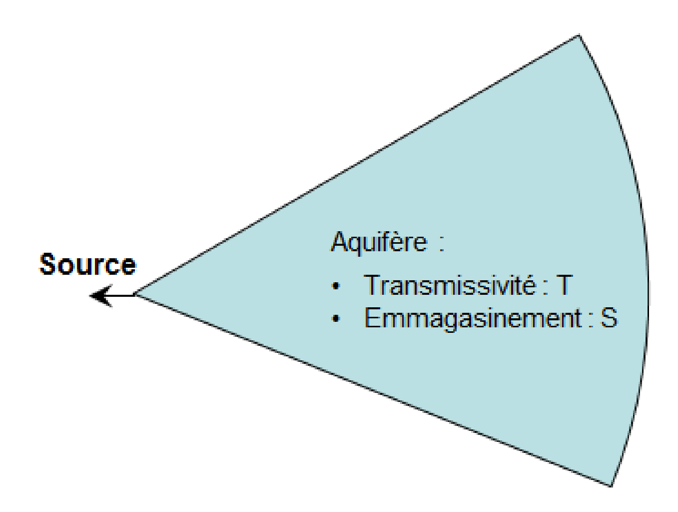


Figure 53 – Schéma physique modélisé avec le code de calcul MARTHE pour la validation des calculs avec GARDÉNIA du débit à l'exutoire d'un bassin versant.

On obtient un débit souterrain décadaire quasi identique (Figure 54) avec une transmissivité de 0.481 m²/s, soit une perméabilité de 9.63 10^{-3} m/s sur 50 mètres d'épaisseur. Comme l'inertie du système est contrôlée par la diffusivité qui est le rapport de la transmissivité au coefficient d'emmagasinement, on aurait obtenu exactement le même ajustement sur les débits souterrains avec par exemple un coefficient d'emmagasinement double et une transmissivité double.

Réciproquement, le fait de reproduire parfaitement avec GARDÉNIA le débit souterrain calculé avec un modèle hydrodynamique physique est une validation forte du schéma de GARDÉNIA pour le calcul de ces écoulements souterrains.

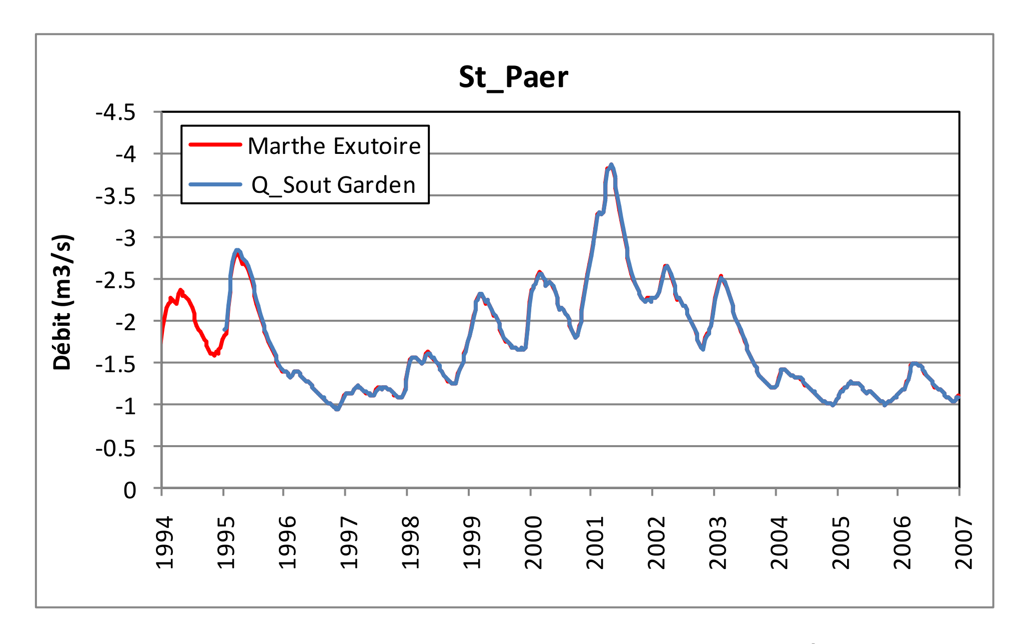


Figure 54 – L'Austreberthe à Saint-Paër : Débit souterrain. Simulation GARDÉNIA (en bleu) et simulation physique MARTHE (en rouge). Les courbes sont superposées et indiscernables.

6.5. VALIDATION DE LA MODÉLISATION D'UN HYDROSYSTÈME RÉEL

Le bassin utilisé pour cette validation est celui de la Voulzie à Jutigny, qui draine un bassin versant de 280 km^2, près de la ville de Provins. On lui associe le niveau piézométrique du piézomètre Saint Martin-Chennetron, d'indice BSS 02603X0009/S1, situé en Seine-et-Marne dans les calcaires de Champigny.

6.5.1. Modélisation avec le code de calcul spatialisé MARTHE en présence d'un cours d'eau spatialisé avec propagation amont - aval

On modélise le domaine avec le code MARTHE comme un aquifère monocouche, traversé du Nord au Sud par un cours d'eau rectiligne : Figure 55.

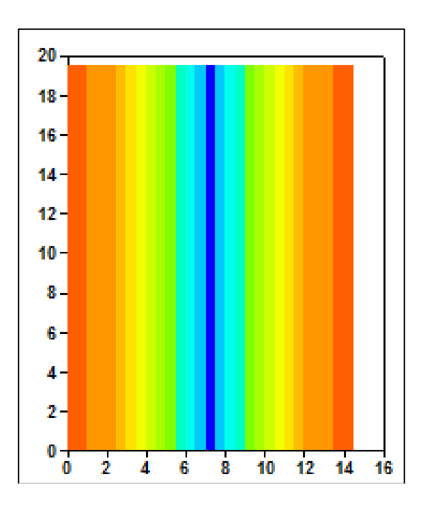


Figure 55 – Schématisation du bassin de la Voulzie pour une modélisation avec le code MARTHE.

On dispose des données suivantes :

- Pluie mensuelle sur le bassin de 1962 à 2004, en mm/mois. C'est une lame d'eau sur le bassin calculé par pondération arithmétique de stations pluviométriques voisines.
- Évapotranspiration potentielle (ETP) à Melun de 1962 à 2004.
- Débit moyen mensuel de la Voulzie à Jutigny de 1974 à 2004.
- Niveau piézométrique mensuel à St Martin-Chennetron de 1970 à 2004.

Les caractéristiques du système sont les suivantes :

Géométrie :

- Le domaine est modélisé par un rectangle de 14.5 km dans la direction Ouest-Est sur 19.5 km dans la direction Sud-Nord, soit 282.75 km^2.
- On choisit un maillage régulier, avec 29 colonnes de 0.5 km de largeur et 39 lignes de 0.5 km de hauteur. Figure 56.
- La cote topographique est fixée arbitrairement à +200 m NGF.
- Le substratum est fixé à la cote 0 m NGF.

Paramètres hydrodynamiques :

- Perméabilité de l'aquifère = 4.594 10^{-5} m/s
- Coefficient d'emmagasinement libre = 1.07 %

Réseau hydrographique :

- Le réseau hydrographique est constitué d'un seul affluent orienté Nord-Sud, situé au milieu du domaine (donc à l'abscisse 7.25 km). On considère, pour simplifier, que son lit est horizontal, ainsi que l'altitude de la surface libre de l'eau.
  - Largeur du cours d'eau = 0.015 km (soit 15 m)
  - Longueur des tronçons de cours d'eau = 0.5 km (par maille)
  - Altitude de la cote du fond du lit = 107 m NGF
  - Cote absolue de l'eau dans le cours d'eau = 107.62 m NGF
  - Épaisseur du lit et des berges = 0.1 m
  - Perméabilité du lit et des berges = 10^{-6} m/s

Paramètres du bilan hydroclimatique :

Dans tout le domaine on fixe les paramètres suivants :

- Capacité du réservoir sol progressif = 103 mm
- Hauteur d'équi-ruissellement = 405 mm
- Temps de ½ percolation = 4.4 mois

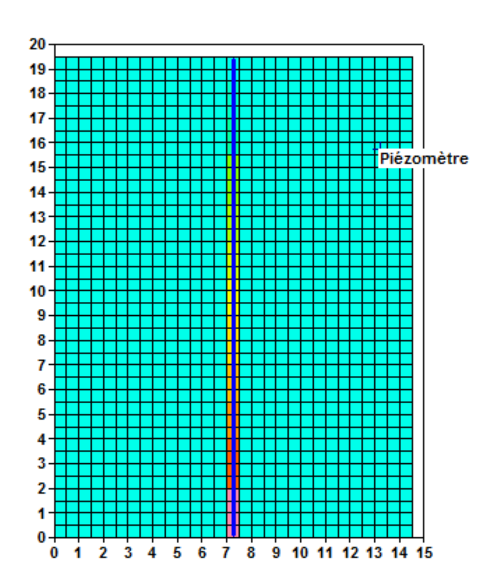


Figure 56 – Maillage et position du cours d'eau et du piézomètre pour la modélisation du bassin de la Voulzie avec le code MARTHE.

Avec ces paramètres on calcule alors avec le code MARTHE, au pas de temps mensuel, l'évolution du débit à l'exutoire du système et l'évolution du niveau piézométrique au piézomètre de 1962 à 2004. La période 1962-1973 sert à l'initialisation des états du modèle.

La Figure 57 montre que l'évolution des débits de la rivière à l'exutoire du bassin, et l'évolution des niveaux piézométriques au piézomètre, sont bien simulés par le modèle physique spatialisé MARTHE.

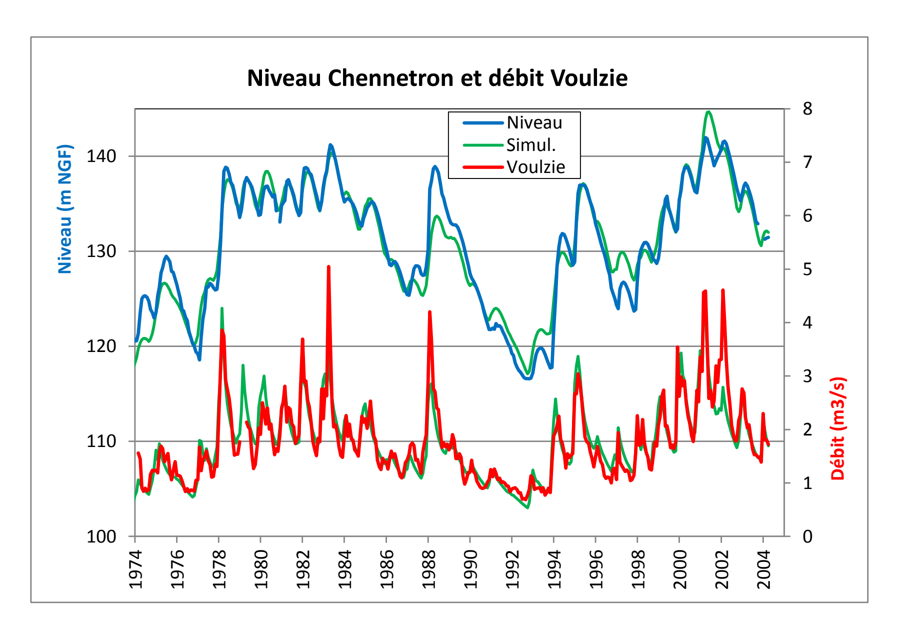


Figure 57 – Simulation avec le code MARTHE du débit de la Voulzie à Jutigny et du niveau du piézomètre St Martin-Chennetron.

6.5.2. Modélisation avec de code de calcul global GARDÉNIA

Avec le code de calcul global GARDÉNIA on modélise également l'évolution des débits de la Voulzie et des niveaux du piézomètre St Martin-Chennetron. On obtient une simulation quasi identique, avec des paramètres très semblables à ceux du code physique MARTHE. Les Figure 58 et Figure 59 montrent que les débits et les niveaux simulés avec les deux codes sont quasi indiscernables. Ceci montre bien que le schéma de GARDÉNIA correspond de manière simplifiée à un schéma physique.

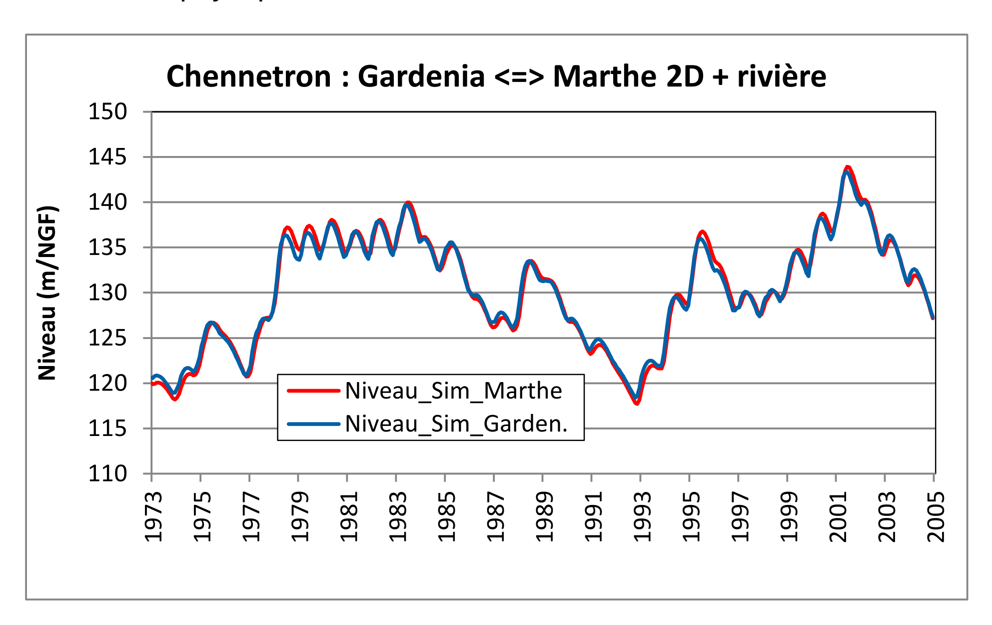


Figure 58 – Comparaison de la simulation du niveau du piézomètre St Martin-Chennetron avec le code MARTHE et avec le code GARDÉNIA.

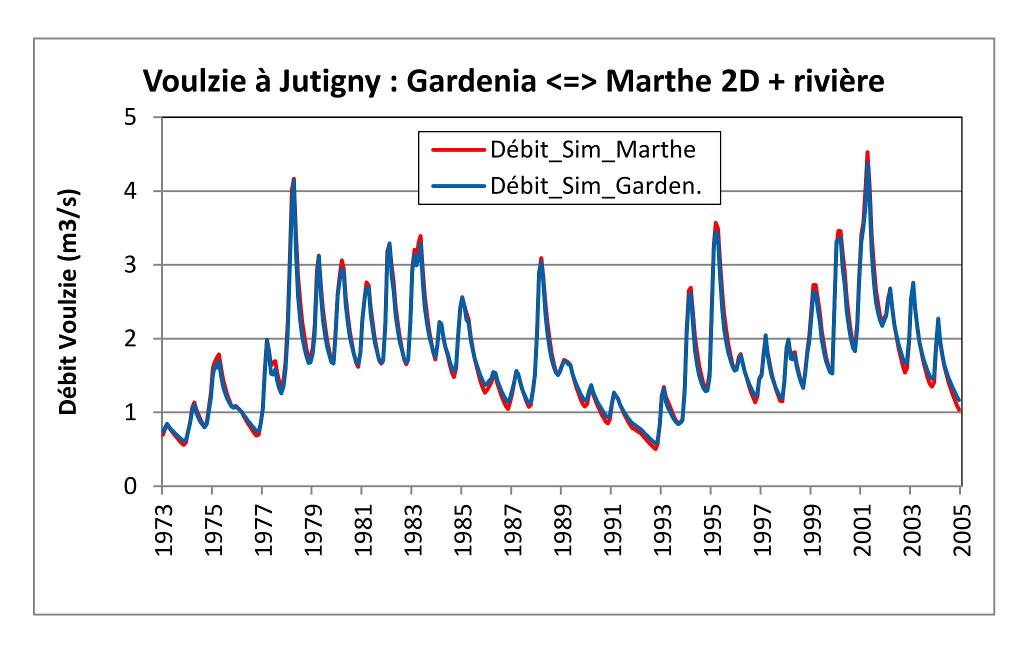


Figure 59 – Comparaison de la simulation du débit de la Voulzie à Jutigny avec le code MARTHE et avec le code GARDÉNIA.

Calcul du temps de ½ tarissement équivalent

Compte tenu de la perméabilité de 4.594 10^{-5} m/s et en prenant en compte l'épaisseur en eau moyenne dans la nappe, qui est de l'ordre de 125 mètres, on obtient dans le code MARTHE une transmissivité est égale à 5.74 10^{-3} m^2/s

On note :

- L : la dimension du système dans le sens de l'écoulement
- T : La transmissivité
- S : le coefficient d'emmagasinement.

La constante de temps du système CT est de l'ordre de **L^2.S / (2T)**.

Ici l'écoulement est principalement orienté des limites latérales vers la rivière au centre. On a donc :
L = 14.5 km / 2 = 7250 m
T = 5.74 10^{-3} m^2/s
S = 0.0107

D'où une constante CT = 7250^2 x 0.0107 / (2 x 5.74 10^{-3}) = 4.899 10^7 secondes = 18.63 mois

On obtient alors le temps de ½ tarissement équivalent par :

Temps_1/2_Tariss = CT x Ln(2)

Soit : Temps_1/2_Tariss. = 12.91 mois qui est identique à la valeur de GARDÉNIA.

Le Tableau 1 permet la comparaison des paramètres de modélisation des deux codes

Paramètre	MARTHE	GARDÉNIA
Coefficient d'emmagasinement	1.07 %	1.07 %
Niveau de base	107.62 m NGF	109.54 m NGF
Capacité du réservoir sol progressif	103 mm	103 mm
Hauteur d'équi-ruissellement	405 mm	330 mm
Temps de ½ percolation	4.4 mois	3.84 mois
Temps de ½ tarissement	12.91 mois (équivalent)	12.83 mois
Temps de concentration	-	0.44 jour
Perméabilité	$4.594\ 10^{-5}$ m/s	

Tableau 1 : Bassin de la Voulzie. Comparaison des paramètres des codes GARDÉNIA et MARTHE

Il apparaît que les paramètres des deux codes de calculs sont donc tout à fait du même ordre de grandeur.

Le fait de reproduire parfaitement avec GARDÉNIA les débits et les niveaux de nappe calculés avec un modèle hydrodynamique physique est une validation forte des lois utilisées par GARDÉNIA pour simuler à la fois les écoulements dans le réseau superficiel et les écoulements souterrains.

7. Calcul des ETP par la formule de Turc. Utilisation du module Etpturc

Ce module de calcul, installé avec la distribution de GARDÉNIA, permet le calcul de l’évapotranspiration potentielle au pas de temps journalier, décadaire ou mensuel par utilisation de la formule mensuelle de Turc (1961) :

$$ETP = 0.40 \cdot \frac{T}{T + 15} \cdot \left(R_g + 50\right) \cdot C$$

avec

$$R_g = Iga \cdot \left(0.18 + 0.62 \cdot \frac{h}{H}\right)$$

ETP = Évapotranspiration potentielle par pas de temps (mm)

T = Température moyenne de l’air sous abri pendant pas de temps en (C°)

Rg = Radiation solaire globale

h = Durée d’insolation par pas de temps (heures)

H = Durée astronomique par pas de temps (heures). H est donné par des tables en fonction du mois et de la latitude

Iga = Radiation solaire directe moyenne sous abri en cal.cm^{-2}j^{-1} (ou radiation atmosphérique). Iga est donné par des tables en fonction du mois et de la latitude

C = Coefficient correcteur
C = 1 si hr > 50 %
$C = 1 + \frac{50 - hr}{70}$ si hr < 50 %

hr = Humidité relative moyenne mensuelle (%).

Déroulement des calculs : Figure 60 à Figure 64.

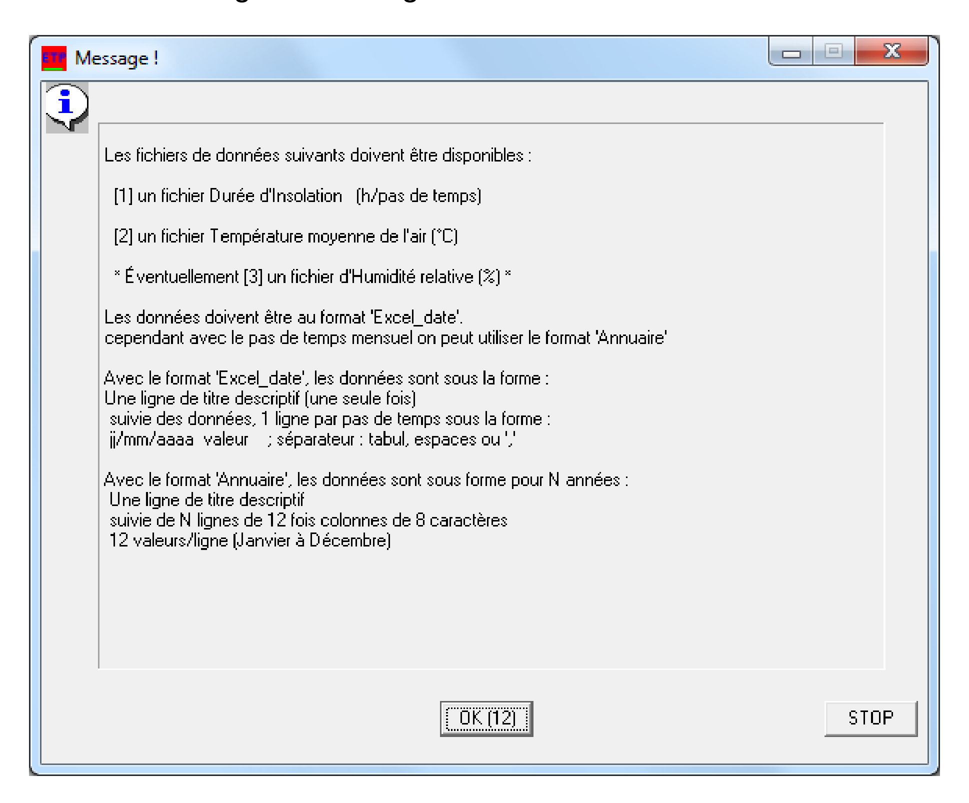


Figure 60 - Module Etpturc : écran d'accueil.

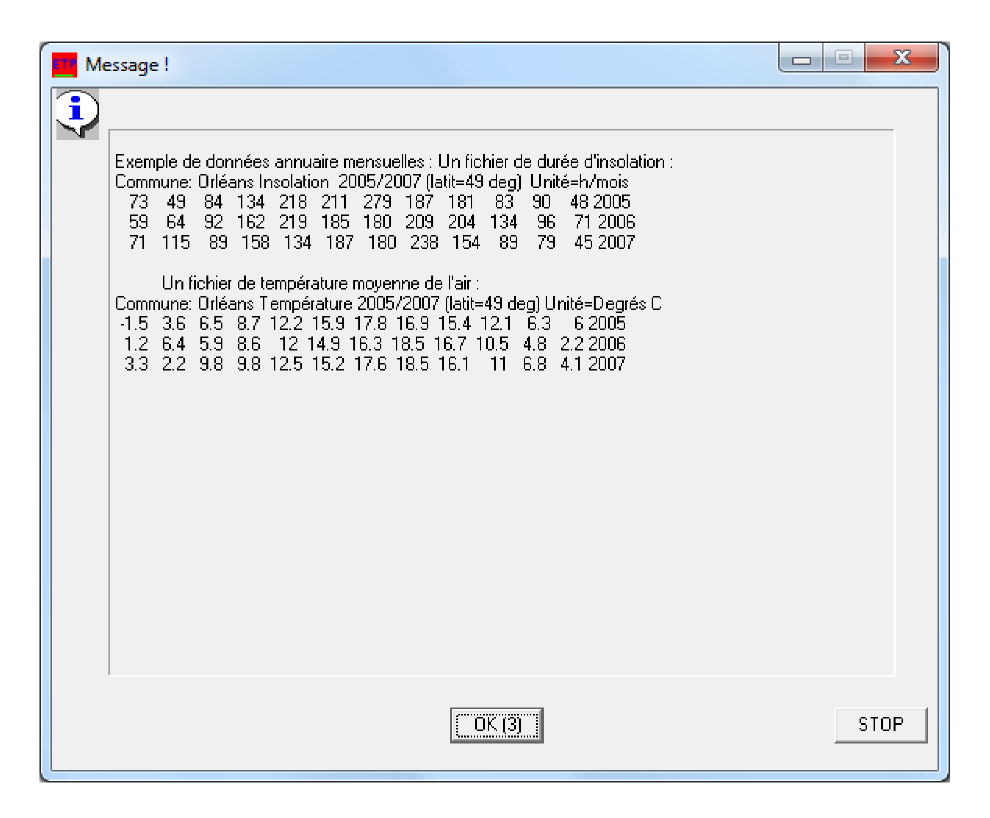


Figure 61 - Module Etpturc : présentation d'un exemple d'application simple.

Présentation d'un exemple d'application simple avec :

- Un fichier de durée d'insolation (en heures par mois).
- Un fichier de température moyenne mensuelle (en °C).

  La température « moyenne » est généralement prise comme la demi-somme de la température minimale et de la température maximale.

L'utilisateur doit préciser :

- Le nom de la station.
- La latitude et l'hémisphère.
- La présence de données d'humidité relative (données nécessaires uniquement si à certains pas de temps l'humidité relative est inférieure à 50 %).
- Le nombre d'années de données.
- Le numéro de la première année.

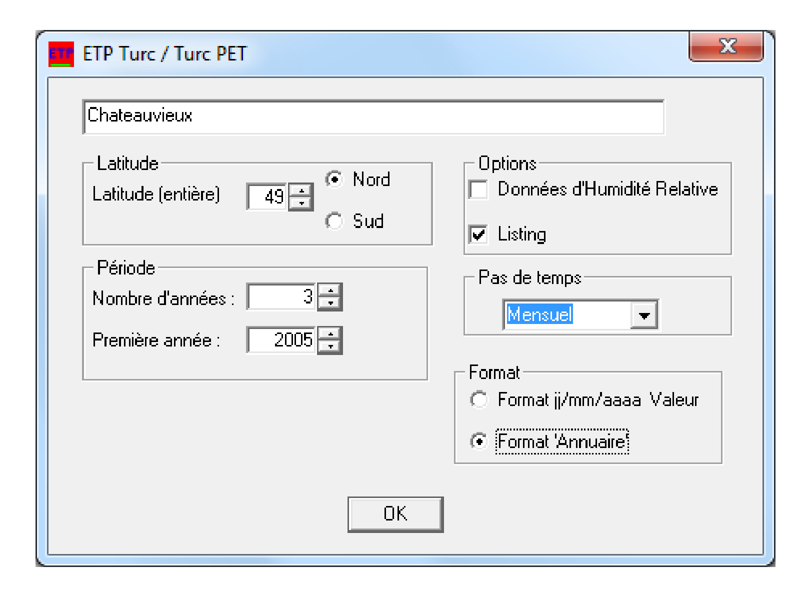


Figure 62 - Module Etpturc : définition de la localisation et de la période de calcul.

L'utilisateur donne alors, par des boites de dialogues classiques, les noms des fichiers de données de température et de durée d'insolation, éventuellement des données d'humidité relative.

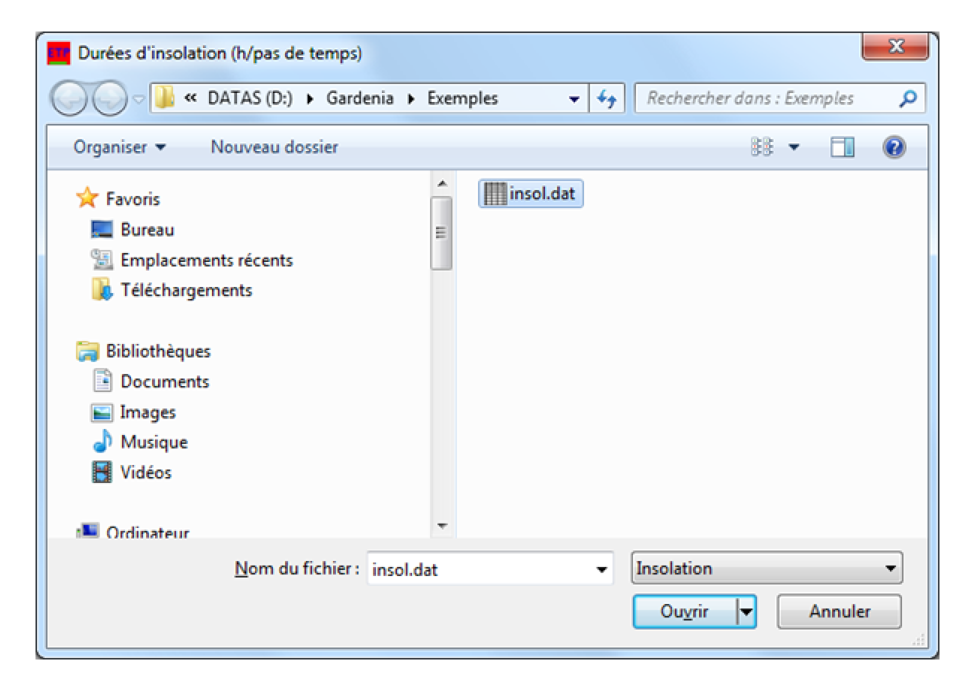


Figure 63 - Module Etpturc : définition des fichiers de données (durée d'insolation, température moyenne et humidité relative).

Les ETP mensuelles calculées sont éditées dans le fichier de nom « etp.dat ». Elles sont exprimées en mm / pas de temps. Si des « détails sur listing » ont été demandés, le détail des calculs est donné dans le fichier de nom « etpturc.txt ».

Exemple de fichier d'Insolation mensuelle (en heures par mois)

```
Commune: Chateauvieux : Insolation  2005/2007 (latit=49 deg)    UNITE=h/mois
    73    49    84   134   218   211   279   187   181    83    90    48 2005
    59    64    92   162   219   185   180   209   204   134    96    71 2006
    71   115    89   158   134   187   180   238   154    89    79    45 2007
```

Exemple de fichier de température mensuelle moyenne (en °C)

```
Commune: Chateauvieux : Température 2005/2007 (latit=49 deg) UNITE=Degrés
  -1.5   3.6   6.5   8.7  12.2  15.9  17.8  16.9  15.4  12.1   6.3     6 2005
   1.2   6.4   5.9   8.6    12  14.9  16.3  18.5  16.7  10.5   4.8   2.2 2006
   3.3   2.2   9.8   9.8  12.5  15.2  17.6  18.5  16.1    11   6.8   4.1 2007
```

Fichier « etp.dat » contenant l'ETP mensuelle calculée (en mm par mois)

```
Situation : Chateauvieux : ETP mensuelle Calculée          UNITE=mm/mois
     0    11  28.5  49.3  86.5  98.8 120.8  86.3    68    34  17.3  12.4 2005
   3.7  18.4  27.5  53.5  85.9  89.3  91.1  95.4  75.5  37.9  14.5   6.1 2006
   9.5   9.8    38  57.3  69.1  90.7  94.5 102.6    64    33  17.4   9.2 2007
```

Figure 64 - Module Etpturc : listage des fichiers d'entrée et du fichier d'ETP calculée.

8. Références bibliographiques

Dagneaux, D. (2010) - Étude d'impacts des changements climatiques et socioéconomiques sur la ressource en eau, à l'échelle d'un bassin versant des Pyrénées Orientales : Le Tech. Mémoire d'Ingénieur IDEA, AgroParisTech, Yvan Caballero (Dir.), http://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00748510. (*Accès Février 2014*).

Herbst M., Fialkiewicz W., Chen T., Pütz T., Thiéry D., Mouvet C., Vachaud G., Vereecken H. (2005) - Intercomparison of Flow and Transport Models Applied to Vertical Drainage in Cropped Lysimeters. *Vadose Zone J.* 2005; 4(2): p. 240-254. ISSN 1539-1663. doi.org/10.2136/vzj2004.0070

Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe (1970) - River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology, 10 (3), 282–290*.

Roche P.A., Thiéry D. (1984) - Simulation globale de bassins hydrologiques. Introduction à la modélisation et description du modèle GARDÉNIA. Rap. BRGM 84 SGN 337 EAU.

Rosenbrock H.H. (1960) - An automatic method for finding the greatest or the least value of a function. Computer journal 3.3., p. 175-184, Oct. 1960.

Thiéry D. (1990) - Logiciel MARTHE. Modélisation d'Aquifère par un maillage rectangulaire en régime transitoire pour un calcul hydrodynamique des écoulements - version 4.3. Rapport BRGM R 32210 EAU 4S 90. 356 pp.

Thiéry, D., (1993) - Modélisation des aquifères complexes - Prise en compte de la zone non saturée et de la salinité. Calcul des intervalles de confiance. *Revue Hydrogéologie*, 1993, n° 4 pp. 325-336.

Thiéry, D. (2003) - Logiciel GARDÉNIA version 6.0 - Guide d'utilisation. Rapport BRGM/RP-52832-FR, 102 p., 42 fig., 3 ann.

Thiéry, D. (2004) - Le modèle GARDÉNIA avec procédures adaptatives Note technique NT EAU 2004/01.

Thiéry, D. (2004) - Prévision de débits ou de niveaux avec le modèle hydrologique global GARDÉNIA 6.5 Note technique NT EAU 2004/02.

Thiéry, D. (2009) – Modèles à réservoirs en hydrogéologie. *in Traité d'hydraulique environnementale - Volume 4 - Modèles mathématiques en hydraulique maritime et modèles de transport*. Tanguy J.M. (Ed.) - Éditions Hermès - Lavoisier. Chapitre 7 pp. 239-249. ISBN 978-2-7462-2006-5.

Thiéry, D. (2010a) – Modélisation des écoulements souterrains en milieu poreux avec MARTHE. *in Traité d'hydraulique environnementale – Volume 9 – Logiciels d'ingénierie du cycle de l'eau*. Tanguy J.M. (Ed.) - Éditions Hermès - Lavoisier. Chapitre 4 pp. 77-94. ISBN 978-2-7462-2339-4.

Thiéry, D. (2010b) – Reservoir Models in Hydrogeology. *in "Mathematical Models Volume 2, chapter 13, pp. 409-418 • Environmental Hydraulics Series". Tanguy J.M. (Ed.) – Éditions Wiley/ISTE London. ISBN: 978-1-84821-154-4*.

Thiéry, D. (2010c) – Groundwater Flow Modeling in Porous Media Using MARTHE. *in "Modeling Software Volume 5, Chapter 4, pp. 45-60 • Environmental Hydraulics Series"*. Tanguy J.M. (Ed.) – Éditions Wiley/ISTE London. ISBN: 978-1-84821-157-5.

Thiéry, D. (2011) - Plaquette de présentation du code de calcul du BRGM GARDÉNIA v8.1. Note technique NT EAU 2011/05. http://www.brgm.fr/sites/default/files/logiciel_gardenia.pdf. (*Accès Février 2014*).

Thiéry D (2013) - Didacticiel du code de calcul Gardénia v8.1. Vos premières modélisations. Rapport BRGM/RP-61720-FR, 127 p., 93 fig. http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-61720-FR.pdf . (*Accès Février 2014*).

Turc L. (1961) - Évaluation des besoins en eau d'irrigation. Évapotranspiration potentielle. *Ann. Agronom*., 1961, 12.

Annexe 1

Schéma de fonctionnement du modèle GARDÉNIA

ÉQUATIONS DE VIDANGE

Le réservoir H est caractérisé par un temps de demi-vidange THG et par une hauteur caractéristique d'écoulement rapide RUIPER.

Les réservoirs G1 et G2 sont caractérisés chacun par un temps de demi-vidange TG1 et TG2.

Les équations de vidanges sont les suivantes, en notant G1 et G2 les niveaux des réservoirs et tg1 et tg2 les constantes de temps de tarissement :

$$\frac{d\,G1}{dt} = -\,G1 / tg1 \qquad (1)$$

$$\frac{d\,G2}{dt} = -\,G2 / tg2 \qquad (2)$$

$$\frac{dH}{dt} = -\,H / thg - H / (thg.RUIPER/H) \qquad (3)$$

en notant : tg1 = TG1 / Ln(2) ;

tg2 = TG2 / Ln(2) ;

(Ln = Logarithme Népérien).

RÉSERVOIRS G1 ET G2

Pour G1 et G2, la solution de l'équation différentielle (1) ou (2) donne le niveau G(t) en fonction du temps :

$$G(t) = G_0 \,.\, e^{-\,t/tg} \qquad (4)$$

soit : $G(d) = G_0 \,.\, e^{-\,d/tg}$ à la fin d'un pas de temps de durée d.

D'après l'équation (1) ou (2) le débit instantané qg par unité de superficie est donné par :

$$qg = -\frac{dG}{dt} = G / tg \qquad \text{soit} \quad qg = \frac{G_o}{tg}\, e^{-t/tg}$$

d'où on obtient, par intégration entre les temps 0 et d, le volume QG écoulé pendant un pas de temps de durée d :

$$QG = G_o \cdot \left[1 - e^{-d/tg}\right] \text{ ; soit } QG = G_o / TGM \qquad (5)$$

en posant : $TGM = 1 / (1 - e^{-d/tg}) = 1 / [1 - e^{-(d.Ln\,2)/TG}]$ (6)

TGM = constante de temps du modèle exprimée en pas de temps du modèle.

NIVEAU DANS LE RÉSERVOIR H

Deux types de vidanges se font simultanément :

- écoulement rapide (non linéaire) : $qr = H^2 / (thg.RUIPER)$ (7)
- percolation vers G1 : $qi = H / thg$ (8)

On voit que : qr / qi = H / RUIPER.

La hauteur RUIPER est donc la hauteur de H pour laquelle les deux vidanges (percolation et écoulement rapide) sont égales :

- quand H > RUIPER, l'écoulement rapide qr est prépondérant,
- quand H < RUIPER, la percolation qi est prépondérante.

Pour supprimer l'écoulement rapide il suffit donc d'imposer une très forte valeur de RUIPER égale à l'infini (en pratique, on impose la valeur code de 9999 mm).

SOLUTION ANALYTIQUE

$$\frac{dH}{dt} = -qr - qi$$

$$\frac{dH}{dt} = -\left(\frac{H^2}{thg.RUIPER} + \frac{H}{thg}\right) \qquad (9)$$

d'où on obtient par intégration la solution :

$$H(t) = \frac{C.RUIPER\ e^{-t/thg}}{1 - C \cdot e^{-t/thg}} \qquad (10)$$

$$C = 1 / (1 + RUIPER / H_0) \qquad (11)$$

avec : $H_0 = H(t = 0)$.

ILLUSTRATION DE LA COURBE DE DÉCROISSANCE DES DÉBITS SORTANT DU RÉSERVOIR H (composante rapide)

$qr(t) = H^2 / (thg.\ RUIPER)$ d'après (7)

On obtient d'après (10) :

$$qr(t) = \frac{C_2\ .\ RUIPER}{thg} \cdot \frac{e_{-2t/thg}}{\left(1 - C \cdot e_{t/thg}\right)^2} \qquad (12)$$

Soit en notant Q_o le débit au temps initial :

$$\frac{qr(t)}{Q_o} = \frac{(1-C)^2}{\left(1 - C \cdot e^{-t/thg}\right)^2}\ e^{-2t/thg} \qquad (13)$$

À titre d'illustration, on a tracé (cf. graphiques ci-contre) les courbes d'évolution de qr / Qo en fonction de la valeur initiale Ho / RUIPER du niveau dans le réservoir H.

Les courbes ont été calculées pour neuf valeurs :

- de Ho / RUIPER = 0.1 (courbe la plus haute ayant la décroissance la plus lente),
- à Ho / RUIPER = 10 (courbe ayant la décroissance la plus rapide).

La non-linéarité est évidente : plus la crue est forte, plus la décroissance est rapide.

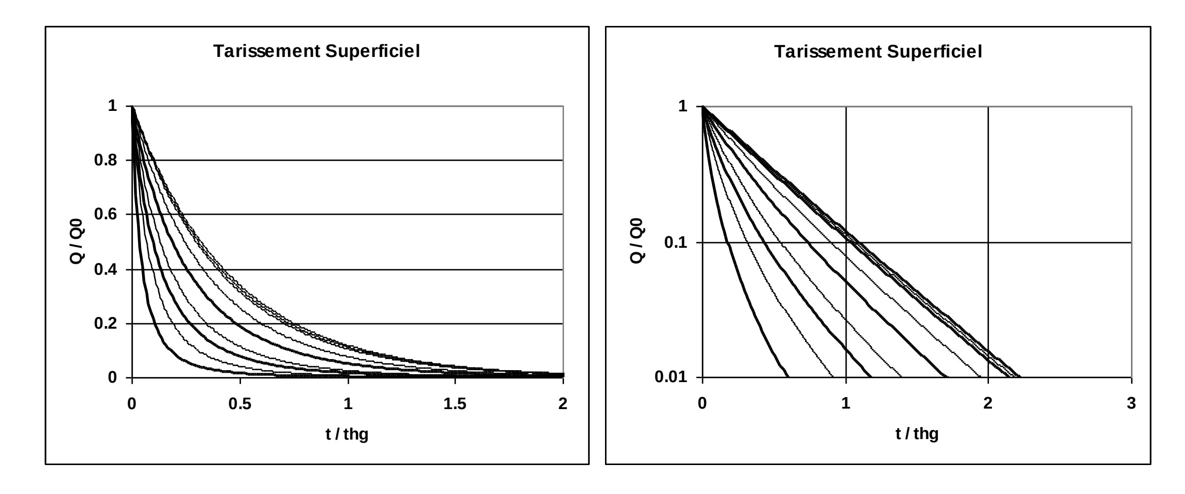


Figure 65 - Courbes de décroissance (non linéaires) du débit sortant du réservoir H pour différents états de remplissages de : Ho/RUIPER = 0.1 (tarissement lent à droite) à Ho/RUIPER = 10 (tarissement rapide à gauche).

DÉBIT ÉCOULÉ PENDANT UN PAS DE TEMPS

Débit de percolation

En intégrant **qi** donné par l'équation (8) entre les temps 0 et **d**, on obtient le volume **QI** écoulé pendant un pas de temps de durée **d**. En utilisant l'expression (10) de **H,** on obtient par intégration :

$$QI = RUIPER \cdot Ln\left(\frac{1 - C \cdot e^{-d/thg}}{1 - C}\right)$$

$$QI = RUIPER \cdot Ln\left(1 + \frac{H_o}{RUIPER} \cdot \left(1 - e^{-d/thg}\right)\right) \qquad (14)$$

$$QI = RUIPER \cdot Ln\left(1 + \frac{H_o}{RUIPER.THGM}\right)$$ avec : THGM = 1 / (1 – $e^{-d/thg}$) (15)

Écoulement rapide

Par conservation de la masse, on a :

$$QR = (H_o - H(d)) - QI$$

Soit en remplaçant H(d) et QI par leurs valeurs :

$$QR = H_o - H_o \cdot \frac{THGM - 1}{THGM + H_o / RUIPER} - RUIPER \cdot Ln\left(1 + \frac{H_o}{RUIPER.THGM}\right) \quad (16)$$

MISE EN ÉQUILIBRE DANS LE RÉSERVOIR H

Dans cette implémentation de GARDENIA, on pratique un « apport brutal » sous forme d'un Dirac, c'est-à-dire qu'on apporte instantanément le volume d'alimentation ALIMH en début de pas de temps.

Soit H le niveau à la fin d'un pas de temps, on a H_o = H + ALIMH. Comme on est à l'équilibre, on doit avoir à la fin d'un nouveau pas de temps : H(d) = H.

On a vu que :

$$H(d) = H_o \cdot \frac{THGM - 1}{THGM + H_o / RUIPER}$$

soit en remplaçant H_o par H + ALIMH :

$$H = (H + ALIMH) \cdot \frac{THGM - 1}{THGM + (H + ALIMH) / RUIPER}$$

d'où une équation du 2ᵉ degré de solution :

$$H_{equ} = 0.5 \cdot (ALIMH + RUIPER) \cdot \left(\sqrt{1 + 4 \cdot \frac{ALIMH \cdot RUIPER \cdot (THGM - 1))}{(ALIMH + RUIPER)^2}} - 1 \right) \quad (17)$$

Il convient de remarquer que dans une implémentation avec un flux constant QALIMH au lieu d'un apport brutal de volume ALIMH on obtiendrait :

$$H_{equ_Continu} = 0.5 \cdot RUIPER \cdot \left(\sqrt{1 + 4 \cdot QALIMH \cdot thg / RUIPER} - 1 \right)$$

Annexe 2

Coefficient d'ajustement et principe du processus itératif

• Coefficient d'ajustement

Calibration sur une série d'observation unique : observations de débits ou bien observations de niveaux de nappe

Dans le code de calcul GARDÉNIA, le coefficient d'ajustement **F** est défini de la manière suivante :

On note **F2** la grandeur suivante, appelée « critère de Nash » (Nash, 1970) :

$$F2 = 1 - \frac{se2}{\sigma_o^2}$$

où : se2 = moyenne des carrés des écarts $= \frac{1}{n}\sum_1^n [(\text{Écart})^2]$

Écart = valeur observée - valeur calculée

n = nombre d'écarts

σ_o^2 = variance des observations (carré de l'écart-type)

(1 - F2) est donc l'erreur quadratique moyenne, normée par la variance des observations.

D'après cette définition :

- F2 varie de -∞ à +1
- F2 = +1 correspond à un ajustement parfait sans aucun écart de simulation.

Dans le cas d'une régression linéaire, F2 serait égal au carré du coefficient de corrélation.

Pour se ramener à un critère de même dimension qu'un coefficient de corrélation, le critère d'ajustement **F** de GARDÉNIA est défini de la manière suivante :

$\boldsymbol{F} = \sqrt[2]{\boldsymbol{F2}}$	si F2 ≥ 0	=> F positif.
$\boldsymbol{F} = -\sqrt[2]{(-\boldsymbol{F2})}$	si F2 < 0	=> F négatif.

Avec cette définition :

- **F** varie aussi de -∞ à +1
- **F** = +1 correspond à un ajustement parfait.

Remarque :

F = 0 si : valeur calculée(i) = moy(valeur observée)

F = 0 si : valeur calculée(i) = valeur observée(i) + σ_o

ou bien

si : valeur calculée(i) = valeur observée(i) - σ_o

(simulation décalée de σ_o)

F = -1.732 si : valeur calculée(i) = valeur observée(i) + $2\sigma_o$ ou valeur observée(i) - $2\sigma_o$

(simulation décalée de $2\sigma_o$)

Calibration sur deux séries d'observations : observations de débits et observations de niveaux de nappe

Si on réalise une calibration simultanément sur le débits à l'exutoire et un niveau piézométrique, l'utilisateur donne un poids à chacune des séries d'observation :

« Poids_sur_Débits » et « Poids_sur_Niveaux »

Ces poids sont normés à 1 de telle sorte que :

Poids_sur_Débits + Poids_sur_Niveaux = 1

Le critère d'ajustement sur les débits et les niveaux est alors :

F = (Poids_sur_Débits x F_Débit) + (Poids_sur_Niveaux x F_Niveaux)

Minimisation du biais sur les débits simulés

Le biais de simulation est l'écart entre le débit moyen simulé et le débit moyen observé. Les deux moyennes sont calculées uniquement sur la période d'observation.

On définit le « Biais_Relatif » par :

Biais Relatif = |Q_simul – Q_Observ| / 0.5 x (Q_simul – Q_Observ)

L'utilisateur donne un poids au biais : Poids_Sur_Biais

Dans GARDÉNIA 8.2 le critère d'ajustement est alors :

F = F_sur_Débits_et_Niveaux - Poids_sur_Biais x Biais_Relatif

Le critère d'ajustement est donc d'autant plus diminué que le poids est grand.

Il n'y a pas de minimisation sur le biais de simulation des niveaux piézométriques car en général on calibre un « niveau de base ». C'est une constante qui, par construction annule le biais sur les niveaux.

- ## Processus itératif

Le détail du processus itératif apparaît dans le fichier de nom « gardelis.txt ».

Les « axes » décrits représentent les paramètres à optimiser : l' « axe » n°1 représente le premier paramètre à optimiser (dans l'ordre défini dans le fichier paramètres), etc.

Le code de calcul fait varier tout à tour un paramètre (les autres restant fixés aux valeurs définies le tour précédent) et examine si la nouvelle valeur du paramètre provoque un gain ou une perte au niveau de l'ajustement.

Le processus consiste à maximiser le coefficient d'ajustement, c'est-à-dire à minimiser le critère **-F**.



Centre scientifique et technique
Service EAU
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34